



Calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) em Portugal

Patrícia Malico de Mello Alexandre

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais

Orientador: Professora Catedrática Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé

Co-Orientador: Doutor Luís Mendes Godinho Milheiro Fontes

Júri:

Presidente: Doutor Ângelo Manuel Melo de Carvalho Oliveira, Professor Catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Vogais: Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor José Augusto Lopes Tomé, Professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Luís Mendes Godinho Milheiro Fontes, Bolseiro Pós-Doc do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Lisboa, 2009

AGRADECIMENTOS

A realização de uma tese de mestrado nunca poderá ser obra de uma pessoa só. É fruto da cooperação, tempo e trabalho de várias pessoas, que de alguma forma contribuíram para a conclusão do presente estudo. A todas elas o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, à Professora Catedrática Margarida Tomé que se disponibilizou não só a orientar o meu trabalho, como a desenvolver o meu espírito crítico. O seu empenho e dedicação foram totais e a ela deixo o meu profundo agradecimento.

Luís Fontes, meu orientador em todo o percurso, sempre com paciência e simpatia. Um sincero obrigado.

Susana Barreiro, pela sua disponibilidade, sempre pronta a ajudar-me com a sua infinita experiência.

Paula Soares, pela sua preciosa ajuda na programação em Fortran e por toda a paciência ao longo de todo o processo.

Anabela Pereira e Lúcia Fernandes, sempre disponíveis para me ajudarem, com simpatia e prontidão, com os pormenores administrativos,.

José Miguel Cardoso Pereira, pelo apoio, amizade e simplesmente por existir.

Aos meus amigos, pela sua presença, companheirismo, alegria, paciência e paz. O pensamento dos momentos que passámos juntos, ou que iremos ainda passar, tornaram o trabalho mais aprazível e leve.

Mãe, por existires, por me ensinares a seguir sempre em frente e por me desafiares a toda a hora a ser eu própria.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projectos:

CARBWOODCORK: Simulação do efeito de diferentes estratégias de gestão e de alterações climáticas na produção de madeira/cortiça e no sequestro de carbono para as principais espécies da floresta portuguesa (FCT POCTI/AGR/57279/2004)

MODNET: Obtenção de um modelo para uso generalizado na estimação da produtividade primária líquida (PPL) e do balanço de carbono para a floresta de produção de Portugal (eucalipto e pinheiro bravo). Este objectivo será alcançado através do teste, calibração e eventual modificação de três modelos de base fisiológica, CASA, FOREST-BGC e **3PG**.

(<http://www.isa.utl.pt/def/projectos/modnet> - tarefa 5)

RESUMO

Em Portugal, o investimento em modelos de base fisiológica tem sido pouco representativo, sendo os únicos exemplos o MAESTRO para a *E. globulus*, a aplicação do modelo FOREST-BGC às espécies *E. globulus* e *Pinus pinaster* em Portugal e, a aplicação do PROMOD (Battaglia and Sands 1997) para as condições portuguesas.

De uma forma geral, o modelo apresentou resultados bastante razoáveis na predição da biomassa acima do solo. Dadas as limitações, não é possível afirmar com certeza e segurança que o conjunto de parâmetros obtido permite uma utilização generalizada ao país. Os resultados são promissores, mas serão necessários mais estudos e realizar mais medições, especialmente de biomassa e de queda de folhada, de forma a se poder alcançar esse desiderato.

No presente trabalho pretende-se calibrar o modelo 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) para a espécie *Pinus pinaster* em Portugal Continental. O 3-PG é um modelo de base fisiológica desenvolvido com o intuito de colmatar o fosso existente entre os modelos empíricos e os modelos muito detalhados de base fisiológica. É um modelo simples que se baseia nos processos fisiológicos mais importantes e que requer poucos parâmetros e alguns dados de inicialização fáceis de se obter.

Palavras-chave – 3PG, modelos de base fisiológica, pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), modelação, calibração.

ABSTRACT

This study aims to calibrate the model 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) to the species *Pinus pinaster* in Portugal. The 3-PG is a process based model developed in order to bridge the gap between empiric models and very detailed physiological models. It is a simple model based on the physiological processes. It requires few parameters and so, easy to obtain.

Little investment in physiological models has been done in Portugal, and the only examples are the application of the MAESTRO model to *E. globulus*, the application of the model FOREST-BGC to *E. globulus* and *Pinus pinaster* in Portugal and the implementation of PROMOD for the Portuguese conditions.

Overall, the model showed quite reasonable results in predicting the biomass above ground. Given the limitations we can not say with certainty and security that this set of parameters allows a widespread use for Portugal. The results are promising, but more studies and measurements are necessary, especially of biomass accumulation in order to be able to achieve a single set of parameters.

Key-words - 3PG, physiological base models, Maritime Pine (*Pinus pinaster*), modeling, calibration.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. O modelo 3-PG	9
2.2. Dados.....	12
2.2.1 Caracterização dos Ensaios	15
2.2.1.1. São Salvador	15
2.2.1.2. Alcácer do Sal	21
2.3. Estrutura e organização dos dados	27
2.4. Calibração	30
2.5. <i>Parâmetros do modelo</i>	33
2.5.1. Alocação de biomassa e <i>turnover</i>	33
2.5.1.1. Alocação de biomassa	33
2.5.1.2. Queda de Folhada e “root turnover”	37
2.5.2. Produtividade primária líquida	38
2.5.2.1. Modificador da temperatura	39
2.5.2.2. Modificador da geada	40
2.5.2.3. Modificadores da água do solo e condutância	40
2.5.2.4. Efeitos da fertilidade	41
2.5.2.5. Modificador de idade	42
2.5.3. Mortalidade e auto-desbaste.....	42
2.5.4. Estrutura da copa e processos fisiológicos	43
2.5.4.1. Área foliar específica	43

2.5.4.2. Intercepção da radiação.....	43
2.5.4.3. Produção e respiração.....	43
2.5.5. Outros parâmetros e factores de conversão	45
2.5.5.1. Fracções dos ramos e do ritidoma	45
2.5.5.2. Densidade básica.....	45
2.5.6. Factores de conversão	45
2.6. <i>Validação</i>	49
3. RESULTADOS.....	51
3.1 Calibração.....	51
3.2 Validação	55
4. DISCUSSÃO.....	59
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
7. ANEXOS	68
Anexo 1 - Tabelas auxiliares - Códigos utilizados na base de dados.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Localização dos ensaios de <i>Pinus pinaster</i> em Portugal Continental	12
Fig. 2 - Evolução do diâmetro quadrático médio para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador.	16
Fig. 3 - Evolução da biomassa total acima do solo (W_a) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador.....	17
Fig. 4 - Evolução da altura dominante (h_{dom}) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador	18
Fig. 5 - Evolução da área basal (m^2) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador	19
Fig. 6 - Evolução da Densidade ($n.^o$ de árvores/ha) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador	20
Fig. 7 - Evolução do diâmetro quadrático médio (d_g) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal.....	22
Fig. 8 - Evolução da biomassa acima do solo (W_a) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal	23
Fig. 9 - Evolução da altura dominante (h_{dom}) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal	24
Fig. 10 - Evolução da área basal (G) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal	25
Fig. 11 - Evolução da densidade (N) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal	26
Fig. 12 – Relações entre as tabelas existentes na base de dados de pinheiro bravo.	29

Fig. 13 – Curva ajustada à relação entre o diâmetro à altura do peito (d) e a biomassa total das partes lenhosas acima do solo (Ws)	36
Fig. 14 – Mapa de distribuição de <i>Pinus pinaster</i> (Fonte: www.bioversityinternational.org – Euforgen)	39
Fig. 15 – Relação entre a água disponível no solo relativa (relASW) e o modificador ambiental f_{SW}	41
Fig. 16 – Ilustração das variáveis de inicialização que é necessário fornecer ao modelo 3-PG..	49
Fig. 17 – Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas testemunhas do ensaio de São Salvador.	53
Fig. 18 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas testemunhas do ensaio de Alcácer do Sal.....	54
Fig. 19 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Fraco” do ensaio de São Salvador.	56
Fig. 20 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Médio” do ensaio de São Salvador.	57
Fig. 21- Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Forte” do ensaio de São Salvador.	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Localização dos ensaios dos quais se utilizaram os dados no presente trabalho (Tavares 2000)	13
Quadro 2 – Número e anos em que foram realizadas as medições nos ensaios.	14
Quadro 3 - Tratamentos aplicados a cada parcela do Ensaio de São Salvador	15
Quadro 4 - Tratamentos aplicados a cada parcela do Ensaio de Alcácer do Sal.	21
Quadro 5 – Classes de estimativa que podem ser atribuídas aos parâmetros (Sands 2004)..	31
Quadro 6 – Classes de sensibilidade que podem ser atribuídas aos parâmetros (Sands 2004)	31
Quadro 7 – Nome, unidades, valores por defeito e classificação dos parâmetros do 3-PG (Fonte: Sands, 2004). (Classe de estimativa: E – Estimados, O – observados, D – por defeito; Classe de sensibilidade: H – Elevada, M – Média, L – Baixa, veja-se Quadro 2).....	46
Quadro 8 – Nomes, unidades e valores dos parâmetros utilizados no modelo. SS – São Salvador; AS – Alcácer do Sal.	52
Quadro 9 – Estatísticas de validação das parcelas do ensaio de São Salvador. EM – Eficiência de modelação; avg Res – Média dos resíduos; avg res - média dos valores absolutos dos resíduos.	55

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o último Inventário Florestal Nacional (IFN5), realizado pela Direcção Geral dos Recursos Florestais (Tomé *et al.* 2007) entre 2005 e 2006, a floresta ocupa 38,4% do território nacional. Por outras palavras, são 3,4 milhões de hectares de floresta (CELPA 2007). Destes, 976×10^3 ha são ocupados por pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), sendo a espécie com maior representatividade no nosso país. Apesar de neste último Inventário (IFN5) a sua área de ocupação ter diminuído, a espécie continua a ser aquela com maior área e a ter uma grande importância económica e ecológica.

A área de distribuição da espécie em Portugal Continental corresponde, sensivelmente, à faixa litoral que vai das bacias do Tejo e do Sado até ao rio Minho, estendendo-se para o interior, nas regiões Norte e Centro, até altitudes entre os 700 e os 900 m, de preferência nas encostas em que a influência atlântica se faz sentir, maioritariamente entre as exposições Sudoeste a Norte (Oliveira and Correia 2002).

Devido à sua plasticidade e rusticidade o pinheiro bravo cresceu um pouco por todo o território, muito para além da sua área óptima de desenvolvimento, através de programas de arborização promovidos pelo governo. A sua importância económica é indiscutível, sendo que a sua madeira pode ser utilizada para lenha, toragem, carvão, pasta de papel e, principalmente, para a indústria de serração. Para além do lenho, produz ainda resina. Todas estas mais-valias da espécie permitiram satisfazer algumas das necessidades das famílias rurais tradicionais e foi, durante décadas, um enorme capital de reserva, especialmente no Centro e Norte do país. Actualmente o êxodo rural causou um desequilíbrio neste sistema, provocando o abandono e a sua substituição por outras espécies como o eucalipto (Luís pinheiro *in* www.remade.com.br). A ausência de gestão activa é um dos grandes obstáculos que a espécie terá que enfrentar se se quiser manter entre as primeiras utilizadas em Portugal. Porém, as actividades de gestão têm vindo a ser transferidas para organizações cada vez mais estruturadas, como são exemplo as Associações de produtores florestais que se encontram por todo o país e, novas políticas públicas foram desenvolvidas no intuito de contrariar este processo.

Os modelos empíricos baseados em ajustamento estatístico de modelos a uma grande quantidade de dados medidos, providenciam informação quantitativa para o planeamento e gestão e, são fortemente dependentes dos dados utilizados na sua construção. Podem fornecer informação sobre a distribuição de diâmetros, mas são, normalmente, específicos para cada local e dependem fortemente do índice de qualidade da estação. São pouco flexíveis e não são capazes de simular o crescimento em condições de stress. Todas estas limitações poderão ser ultrapassadas se se recorrer a modelos de base fisiológica, isto é, que são desenvolvidos com base nas relações solo-planta e nas dinâmicas dos processos que controlam o carbono, os nutrientes e o uso de água. Um dos principais problemas dos modelos de base fisiológica é o terem sido desenvolvidos com o propósito de compreender mecanismos que incluem parâmetros e variáveis de inicialização que não se encontram facilmente disponíveis e os resultados que disponibilizam não são, muitas vezes, interessantes para a gestão. Em Portugal, investimento em modelos de base fisiológica tem sido pouco representativo, sendo os únicos exemplos o MAESTRO (Tomé 1997) para a *E. globulus*, a aplicação do modelo FOREST-BGC (Running and Gower 1991) por Lopes (2005) às espécies *E. globulus* e *Pinus pinaster* em Portugal e, a aplicação do PROMOD (Battaglia and Sands 1997) para as condições Portuguesas. Existe também um modelo que combina os princípios dos modelos de base fisiológica com modelos de árvore individual, sendo por isso designado de modelo híbrido. Este modelo tem o nome de BLOG-3PG (Tomé 2004).

O 3PG é um modelo de base fisiológica desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), com o intuito de colmatar o fosso existente entre os modelos empíricos e os modelos muito detalhados de base fisiológica. É um modelo simples que se baseia nos processos fisiológicos seleccionados por Landsberg e Waring (1997) como os mais importantes e que requer poucos parâmetros e alguns dados de inicialização fáceis de se obter. É amigável ao utilizador, utiliza o Excel (com o modelo implementado numa macro Visual Basic) como interface, requer poucos *inputs* e conseguem-se obter resultados realistas de crescimento de povoamentos equiétricos e, encontra-se disponível na internet (<http://www.ensijsv.com>). Como resultados obtêm-se variáveis de interesse para a gestão como biomassa, volume e densidade por hectare. Para além de ser um modelo simples, de fácil utilização e gratuito, já foi testado e implementado em diversas condições edafo-climáticas na Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos da América, Brasil, África do Sul, Grã-Bretanha, Chile, China, Suécia,

Filândia e Portugal e, para diversas espécies: *Eucalyptus globulus* (Fontes *et al.* 2006; Sands and Landsberg 2002), *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid. X *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake (Stape *et al.* 2004), *E. grandis* x *E. camaldulensis* Dehnhardt (Dye *et al.* 2004), *E. grandis* (Almeida *et al.* 2004a; Esprey *et al.* 2004), *Pinus taeda* L. (Landsberg *et al.* 2001a), *Pinus ponderosa* Dougl. Ex P. & C. Laws. (Coops *et al.* 2005; Law *et al.* 2000), *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Waring and McDowell 2002), *Pinus patula* Schiede ex Schlecht. & Cham. (Dye 2001), *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. (Waring 2000), *Corymbia maculata* Hill e Johnson, *Araucaria cunninghamii* Ait. Ex D. Don, *Eucalyptus pilularis* Sm., *Eucalyptus delagatensis* R.T. Bak., *Picea abies* (L) Karst., *Pinus radiata* D. Don. e *Pinus elliottii* Engelm. (Landsberg *et al.* 2001b; Landsberg *et al.* 2003).

O presente trabalho pretende fazer uma primeira abordagem à calibração do modelo 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth, Landsberg e Waring (1997)) para a espécie *Pinus pinaster* em Portugal Continental. O tema surge no âmbito dos projectos CarbWoodCork¹ e MODNET², com o intuito de encontrar os valores dos parâmetros do modelo para aquela espécie em Portugal. Para tal, recorreu-se aos dados de ensaios de *Pinus pinaster* que o grupo de Inventariação e Modelação de Recursos Florestais (GIMREF) tinha à sua responsabilidade, procedendo-se à organização e estruturação daqueles que foram considerados adequados para este trabalho para, posteriormente, usá-los para calibrar e validar o modelo. Os ensaios diferem entre si quanto aos objectivos, sendo a maioria ensaios de desbastes, existindo alguns de compassos. Inicialmente usou-se apenas parcelas testemunhas, sem qualquer intervenção, para calibrar o modelo, adicionando-se mais tarde as parcelas com desbastes para a validação.

¹ CarbWoodCork: Simulação do efeito de diferentes estratégias de gestão e de alterações climáticas na produção de madeira/cortiça e no sequestro de carbono para as principais espécies da floresta portuguesa (FCT POCTI/AGR/57279/2004)

² MODNET: <http://www.isa.utl.pt/def/projectos/modnet> - tarefa 5

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. O modelo 3-PG

O modelo desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), denominado Physiological Principles Predicting Growth (3-PG), é um modelo generalizado (i.e., não específico de cada local, mas precisa de ser parametrizado para espécies individuais (Girardin 2008)) de crescimento de povoamentos florestais equiênicos ou, muito homogêneos de base fisiológica. Requer poucas variáveis de inicialização para caracterizar a estação e variáveis climáticas fáceis de se obter. Prevê o desenvolvimento de um povoamento, o uso de água e a água disponível no solo ao longo do tempo. Como variáveis primárias de resposta obtém-se a produtividade primária líquida, a alocação de carbono para folhas, tronco e raízes, número de árvores por hectare, a água disponível no solo e a transpiração com uma periodicidade mensal. Calcula também variáveis de interesse para a gestão florestal, tais como o índice de área foliar, a área basal, diâmetro quadrático médio, volume e o acréscimo médio anual.

Requer, como dados de base climáticos, valores médios mensais de radiação solar, temperatura do ar média mensal, déficit de saturação de pressão de vapor mensal, precipitação total mensal e número de dias por mês com geada. O modelo pode correr para um qualquer número de anos e devem ser utilizados dados climáticos da estação meteorológica mais próxima do povoamento em estudo, podendo, no entanto, recorrer-se às normais climatológicas da região. Do povoamento, necessita de valores iniciais de biomassa de folhas, tronco, ramos e raízes. Outro tipo de dados iniciais necessários, são a latitude, o índice de fertilidade, a textura do solo e o valor máximo de água que o solo pode conter. Alguns dos parâmetros são genéricos, isto é, são valores conhecidos da ecologia das espécies e relativamente constantes (p.e. resposta dos estomas às alterações da pressão de vapor). Outros podem ser obtidos da literatura, ou através de valores observados nos dados disponíveis como é o caso da densidade da madeira.

É possível identificar cinco sub-modelos no 3-PG: a assimilação de carboidratos; a alocação de carbono para folhas, tronco e raízes; a evolução do número de árvores; o balanço de água no solo e a conversão da biomassa em variáveis de interesse para a gestão (Sands and Landsberg 2002).

A assimilação de carboidratos (produtividade primária líquida e bruta)

O cálculo da produtividade primária bruta (P_G (t_{DM} ha^{-1})) é feito a partir do valor de radiação fotosinteticamente activa incidente (PAR ou ϕ_p ($mol\ m^{-2}$)) e da eficiência quântica do copado (α_c ($mol\ mol^{-1}$)), que pode ser modificada por condições ambientais. P_G é proporcional à radiação absorvida pelas copas (ϕ_{pa} ($mol\ m^{-2}$)), sendo 1 mol C equivalente a 24 g_{DM} . ϕ_{pa} é determinada a partir do índice de área foliar (LAI) e da PAR através da lei de Beer. ϕ_p que incide na copa das árvores é determinada a partir da radiação solar global incidente (Q ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)), pressupondo que 1 MJ de radiação solar é equivalente a 2,3 mol de PAR. A eficiência quântica do copado (α_c ($mol\ mol^{-1}$)) é reduzida tendo em conta diversos modificadores ambientais – f_x ($0 \leq f_x \leq 1$) –, função do défice de saturação de pressão de vapor (f_{VPD}), da água disponível no solo (f_{SW}), da temperatura média do ar (f_T), do número de dias com geada por mês (f_F), da fertilidade da estação (f_N) e da idade do povoamento (f_{age}) (Sands and Landsberg 2002). A produtividade primária líquida (NPP ou P_N) é uma fracção constante γ ($=0,47$) da produtividade primária bruta (GPP) (Waring *et al.* 1998).

Alocação de biomassa/carbono

A alocação da NPP para as raízes é determinada pelas condições de crescimento que são expressas na disponibilidade em água do solo, no défice de pressão de vapor e na fertilidade da estação, de acordo com princípios bem estabelecidos (p.e. (Beets 1996; Landsberg 1997a), p.150). A fracção de NPP alocada para as raízes (η_R) aumenta quando a fertilidade do solo e/ou a disponibilidade de água no solo são baixas. A alocação de biomassa para as folhas (η_F) e tronco com ramos (η_S) varia com as condições de crescimento e depende do tamanho médio das árvores, de tal forma que η_F diminui e η_S aumenta com a idade do povoamento. Landsberg e Waring (1997) determinaram originalmente o η_F e η_S a partir da fracção das derivadas das funções alométricas para a biomassa das folhas, ramos e tronco médias (W_F a W_S (kg_{DM} por árvore)), em função do diâmetro médio (d (cm)). O diâmetro é determinado a partir da biomassa do tronco (W_S) ao nível do povoamento, que é dividida pelo actual número de árvores, e invertendo a relação alométrica entre W_S e d . O resultado-chave obtido foi que a razão ρ_{FS} ($=\eta_F/\eta_S$) entre a partição para as folhas para o tronco é também uma função alométrica de d . Qualquer relação entre W_F e d , determinada antes do fecho do

copado, deixa de fazer sentido logo após o fecho do copado à medida que d continua a aumentar e o W_F mantém-se num estado quase estável (Sands and Landsberg 2002).

Evolução do número de árvores

As alterações no número de árvores do povoamento no tempo são calculadas utilizando um sub-modelo derivado da lei dos 3/2 e taxas de crescimento de troncos. Recorre à equação que determina a alocação do carbono para as folhas e tronco e a restrições aos padrões de crescimento. Um limite superior (W_{sx} ($\text{kg}_{\text{DM}} \text{ árvore}^{-1}$)) da biomassa de troncos (W_s) é calculado para um determinado valor de densidade do povoamento (N). A lei do auto-desbaste é parameterizada por uma estimativa de W_{sx} para a árvore média em povoamentos em auto-desbaste. Se, num dado momento, a biomassa do tronco da árvore média é maior que W_{sx} , a população é reduzida até um número consistente com W_{sx} . Uma vez que a mortalidade altera tanto o número de árvores como a biomassa, pode ser necessário recorrer a uma aplicação iterativa da lei do auto-desbaste para assegurar que a lei é cumprida para o novo estado. Quando há remoção de árvores, assume-se que cada tronco retirado tem aproximadamente 20% da biomassa do tronco médio e que não ocorre perda de folhas. Isto simula o facto de que as árvores que morrem, são normalmente as mais fracas e mais pequenas e com muito poucas folhas (Sands and Landsberg 2002).

Balanço de água no solo

O 3-PG inclui um modelo simples de balanço de água no solo, que trabalha com um ciclo mensal. À precipitação mensal (mais irrigação) contrapõem-se a evapotranspiração, que é calculada através da equação de Penman-Monteith (Landsberg and Gower 1997). A interceptação pela copa é uma percentagem fixa da precipitação, podendo também, a partir de determinado valor, ser função do índice de área foliar. A água do solo em excesso é perdida como escoamento superficial. Assume-se que o défice de pressão de vapor (f_{VPD}), a água disponível no solo (f_{SW}) e a idade do povoamento (f_{AGE}) afectam a condutância dos estomas. A condutância da copa (g_c (m s^{-1})) é determinada a partir de uma condutância dos estomas potencial que é ajustada pelo modificador da idade (f_{age}) e pelo menor dos modificadores ambientais f_{SW} e f_{VPD} , e aumenta com o aumento do índice de área foliar (LAI) até ao máximo da condutância da copa (g_{Cx} (m s^{-1})).

2.2. Dados

Os dados potencialmente disponíveis e utilizáveis para o presente trabalho provêm de 11 ensaios de pinheiro bravo realizados em diferentes alturas por diferentes instituições. Inicialmente estavam inseridos no Projecto PRAXIS n.º 3/3.2/FLOR/2120/95, sendo mais tarde transpostos para o Projecto PAMAF 8165³. Este lote de ensaios está distribuído na faixa central do País, indo das terras do litoral até às terras interiores beirãs (Fig. 1).

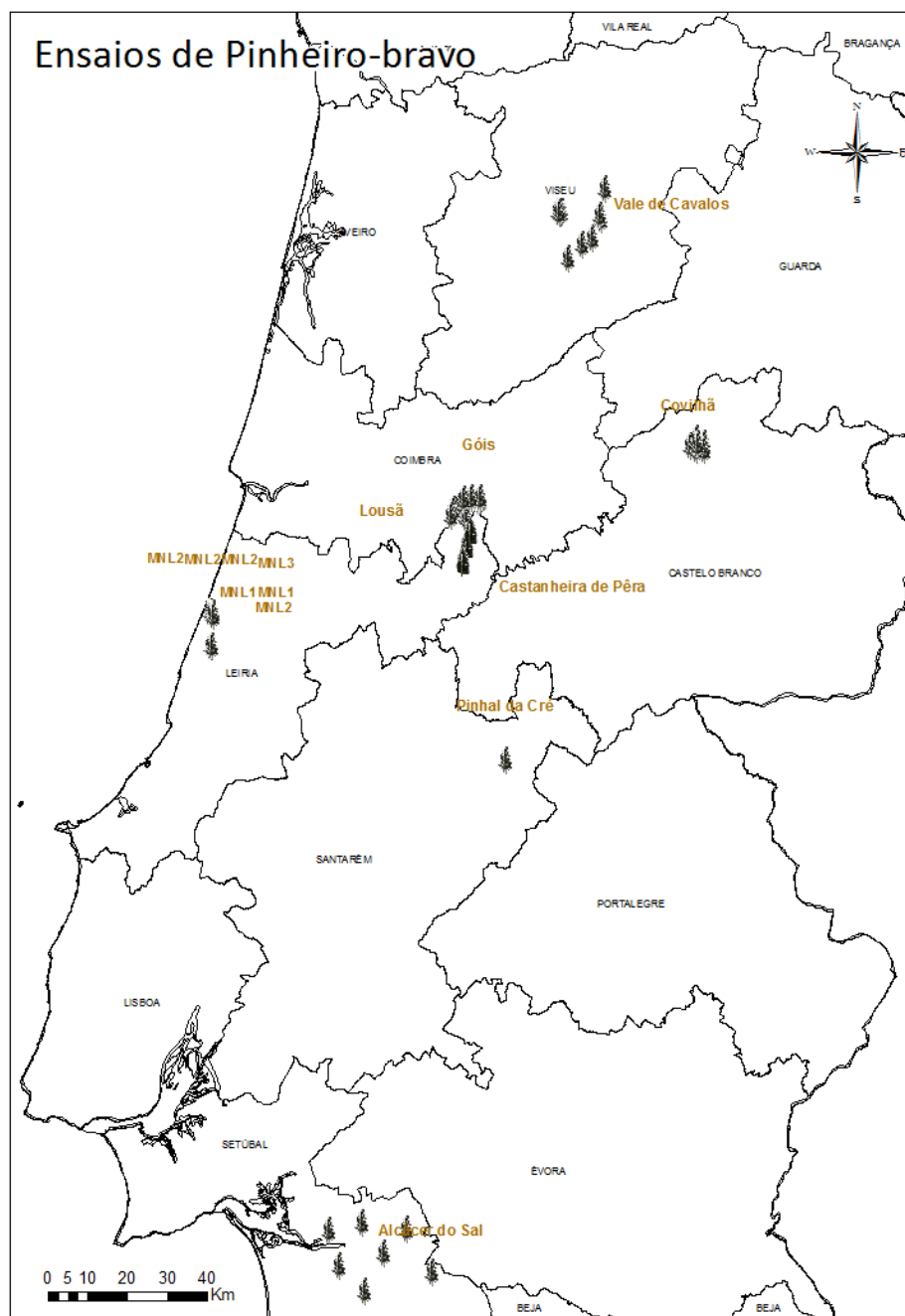


Fig. 1 – Localização dos ensaios de *Pinus pinaster* em Portugal Continental

³ - Projecto financiado pelo Programa PAMAF IED, Medida 4, Acção Investigação Experimentação e Demonstração.

A localização e respectiva entidade responsável pelo ensaio encontra-se no Quadro 1. Actualmente, algumas das parcelas aqui estudadas já desapareceram por acção de incêndios que ocorreram após a sua instalação e medição, ou foram abatidos por questões fitosanitárias.

Quadro 1 – Localização dos ensaios dos quais se utilizaram os dados no presente trabalho (Tavares 2000)

N.º Ensaio na Base de dados	Instituição responsável	Designação do Ensaio	Localização
1	EFN	Desbastes e desramas em pinhal bravo puro regular - Alcácer do Sal	Alcácer do Sal, Murta
2	EFN	Desbastes e desramas em pinhal bravo puro regular - Castanheira de Pêra, Lousã	Perímetro Florestal Castanheira de Pêra; Serra da Lousã
3	EFN	Desbastes e desramas em pinhal bravo puro regular - Tortosendo, Covilhã	Perímetro Florestal Serra da Estrela; Tortosendo, Covilhã
4	ISA/DEF	Ensaio de desbastes de Góis	Núcleo; Lomba do Mouro; Perímetro Florestal Góis
5	EFN	Regeneração natural de pinhal na MNL; zona improdutivo litoral.	Perímetro Florestal da Oitava; Serra do Mouzinho; Lousã
6	EFN	Regeneração natural de pinhal na MNL; zona improdutivo litoral.	Mata Nacional de Leiria; Marinha Grande
7	ISA/DEF	Ensaio de desbastes da MNL	Mata Nacional de Leiria; Marinha Grande
8	ISA/DEF	Ensaio de desbastes do Pinhal da Cré - Mouriscas	Mouriscas; Abrantes
9	ISA/DEF	Ensaio de desbastes de São Salvador - Viseu	Perímetro Florestal de São Salvador; Viseu
10	ISA/DEF	Ensaio de Compassos - Vale de Cavalos	Vale de Cavalos; Viseu
11	ISA/DEF	Ensaio de Compassos na MNL	Mata Nacional de Leiria; Marinha Grande

Para efeitos quer de calibração, quer de validação, é importante que o número de medições realizadas em cada ensaio seja elevado, de forma a obter-se uma base sólida ao longo do tempo. Uma vez que a maioria dos ensaios referidos anteriormente apresenta poucas medições, optou-se por utilizar as parcelas testemunha dos ensaios de Alcácer do Sal e São Salvador para a calibração e as restantes parcelas para a validação, pois eram os que apresentavam um número de medições consideradas suficientes (Quadro 2). Considerou-se seis medições um número mínimo aceitável.

A escolha dos ensaios de São Salvador e de Alcácer do Sal, para além do número de medições, está relacionada com as suas classes de qualidade. Este ensaios representam classe de qualidade distintas, em que Alcácer do Sal tem um índice de qualidade da estação

(S) baixo, entre os 17 e os 18 m aos 50 anos de idade, e o ensaio de São Salvador tem um S entre os 23 e os 24 m.

O ensaio designado por MNL3, embora tenha um número de medições elevado não foi utilizado porque a maior parte das mesmas foi realizada em idades muito novas, isto é, quando a maioria das árvores ainda não tinha atingido o diâmetro à altura do peito mínimo para ser medido.

Quadro 2 – Número e anos em que foram realizadas as medições nos ensaios.

Nome do Ensaio	Anos medidos	N.º de medições	Nome do Ensaio	Anos medidos	N.º de medições
Alcácer do Sal	1986 a 1992 1995, 1998 e 1999	10	Covilhã	1999 2000 2002	3
Castanheira de Pêra	1999 2000 2002	3	MNL2	1992 a 1997 e 2000	7
Lousã	1998 1999 2000	3	MNL3	1996 a 2003	8
MNL1	1993, 1995, 1996, 1998 a 2000	6	Vale de Cavalos	1996 1997 1998 1999	4
Pinhal da Cré	1997 1999 2000 2005	4	São Salvador	1990, 1991, 1994, 1997, 1999, 2000 e 2005	7
Góis	1994 1999	2			

2.2.1 Caracterização dos Ensaios

2.2.1.1. São Salvador

O ensaio de São Salvador localiza-se no Norte do país, no Perímetro Florestal de São Salvador, a 20 km de Viseu. O povoamento foi instalado em Março de 1962 por sementeira a lanço e, até à instalação do ensaio em 1981, não havia sofrido qualquer tipo de intervenções culturais com excepção de limpezas e pequenos cortes sanitários (Rebelo 1981). O Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia (DEF) ficou responsável pelo ensaio a partir de 1994, tendo este sido incluindo no Projecto PAMAF 8165. O objectivo do ensaio era o de estudar o efeito de três graus de desbaste no desenvolvimento do povoamento. O delineamento experimental consiste em 3 blocos casualizados completos com três graus de desbaste e uma testemunha. O ensaio era constituído, inicialmente, por 12 parcelas rectangulares de 1000 m². Porém, em 1990, foi criada uma bordadura de forma a minimizar os efeitos das parcelas e/ou povoamentos adjacentes, tendo-se codificado as árvores que se encontravam dentro da parcela útil, que passou a ter 500 m².

Os tratamentos foram distribuídos pelas parcelas de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Tratamentos aplicados a cada parcela do Ensaio de São Salvador

Bloco	Parcela	Tratamento
I	1	Testemunha
	2	Desbaste Fraco
	3	Desbaste Médio
	4	Desbaste Forte
II	5	Testemunha
	6	Desbaste Fraco
	7	Desbaste Médio
	8	Desbaste Forte
III	9	Testemunha
	10	Desbaste Fraco
	11	Desbaste Médio
	12	Desbaste Forte

A evolução de algumas variáveis do povoamento encontram-se ilustradas nas figuras 2 a 6.

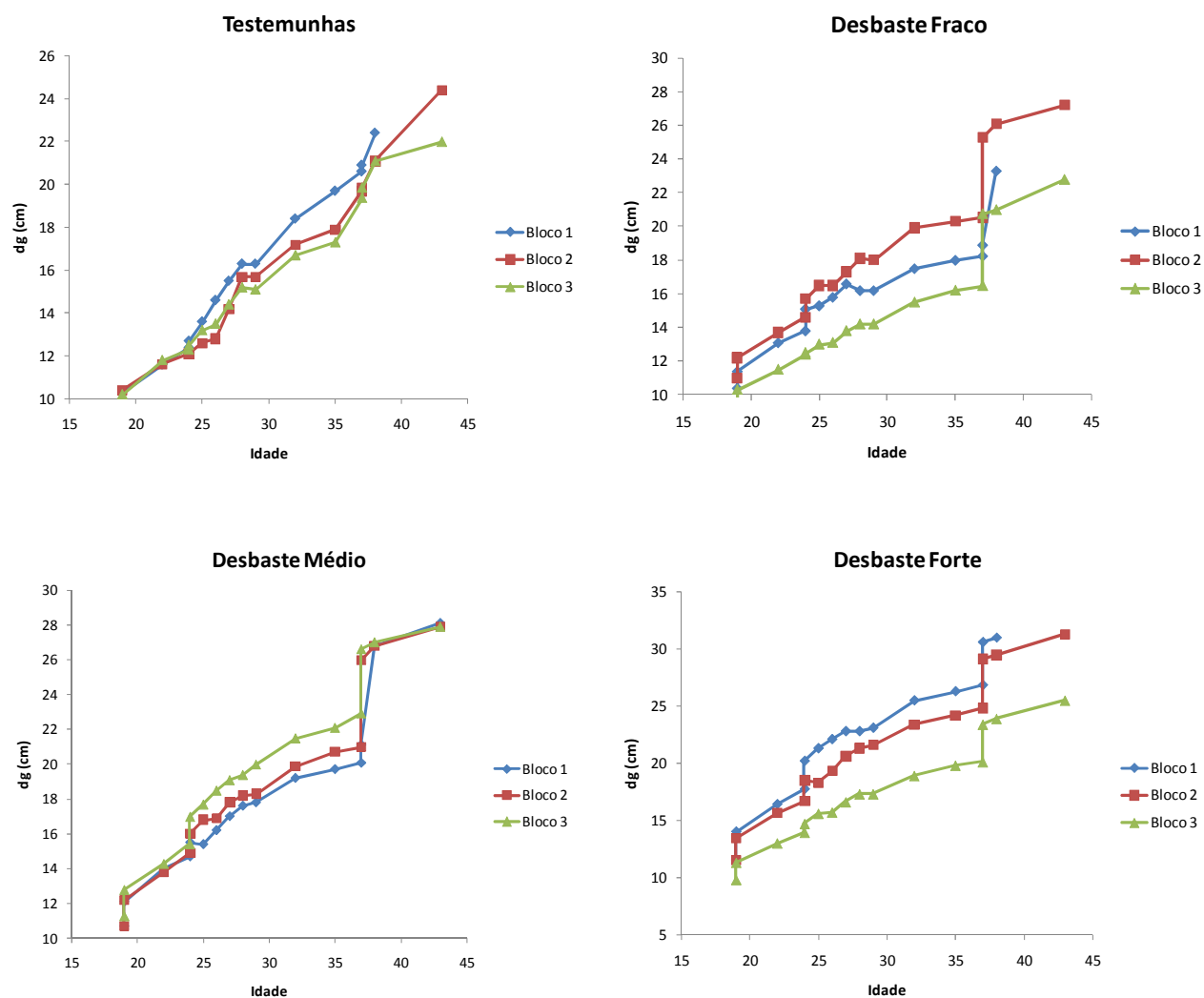


Fig. 2 - Evolução do diâmetro quadrático médio para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador.

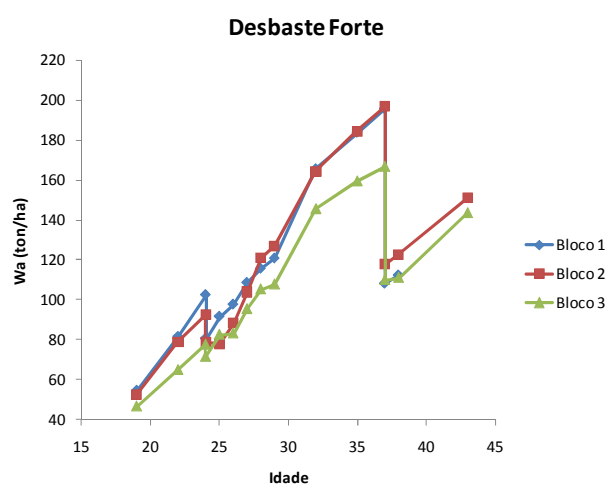
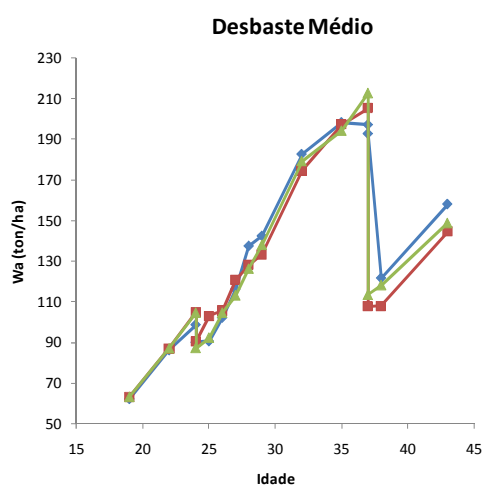
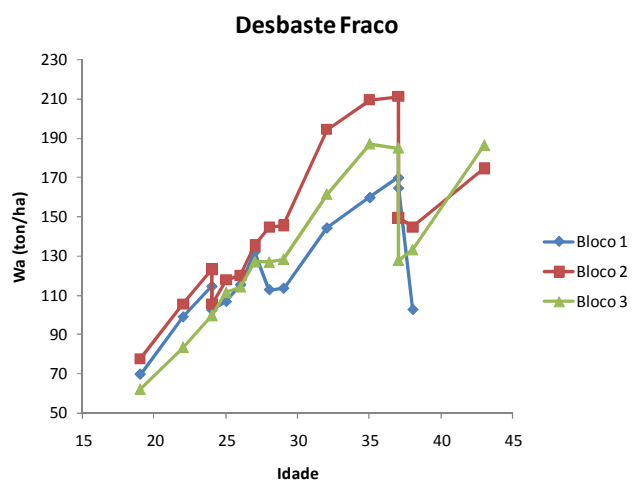
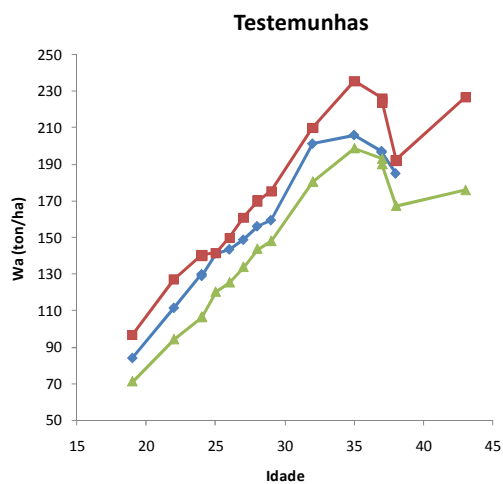


Fig. 3 - Evolução da biomassa total acima do solo (W_a) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador.

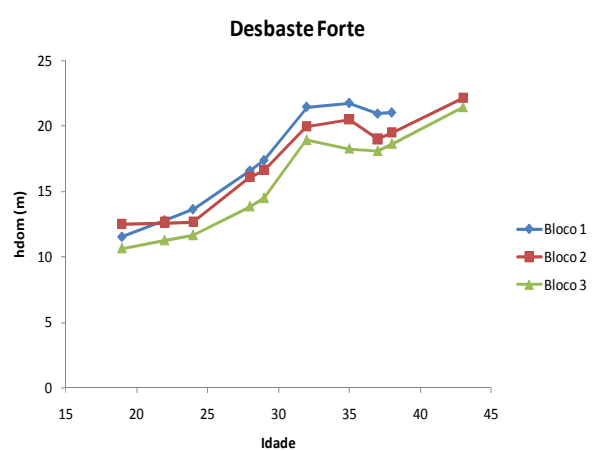
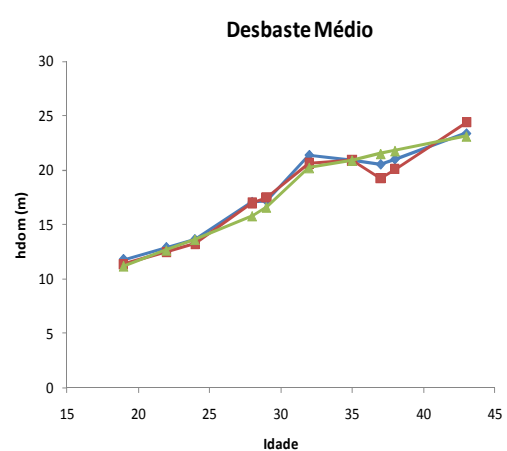
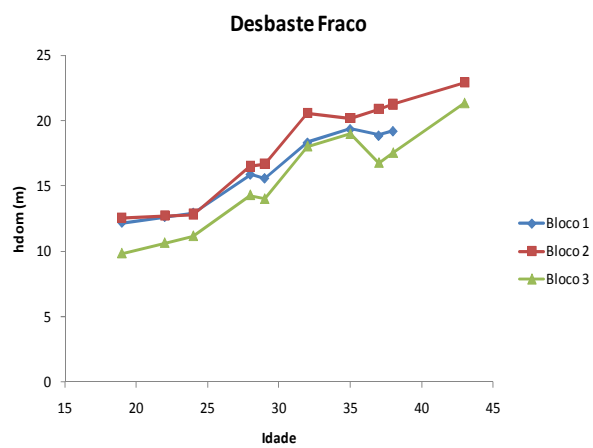
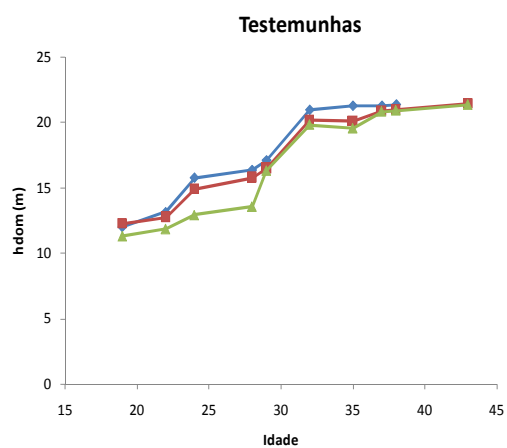


Fig. 4 - Evolução da altura dominante (hdom) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador

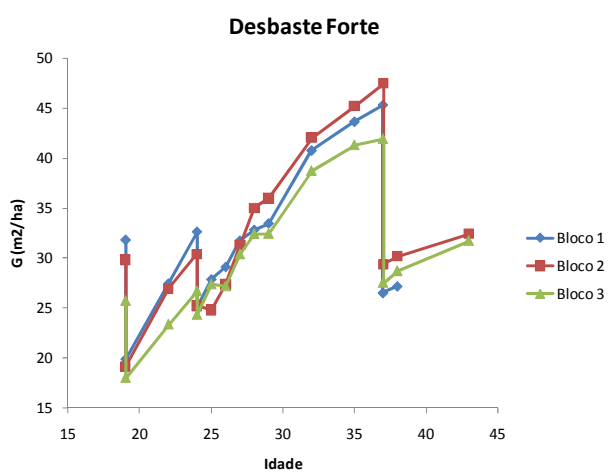
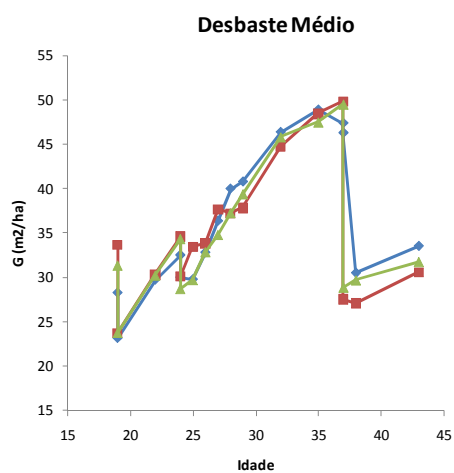
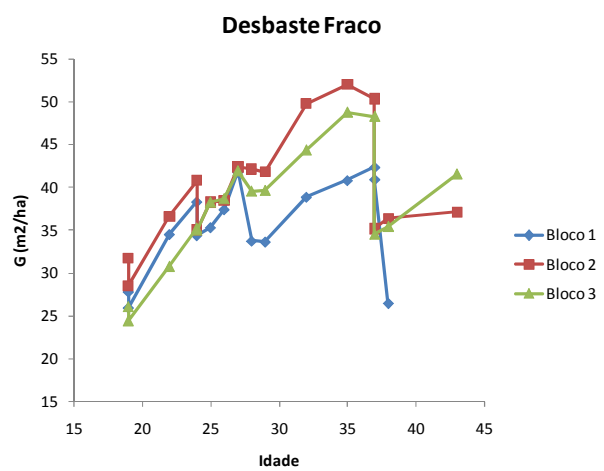
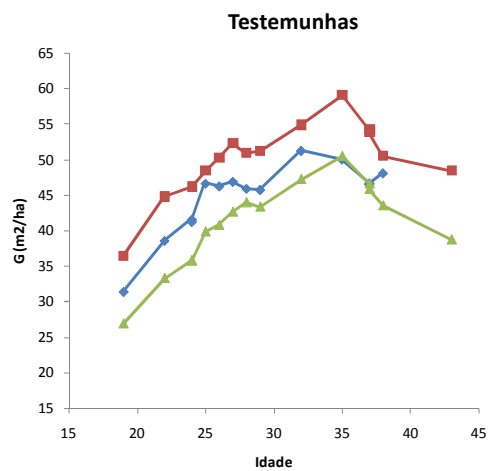


Fig. 5 - Evolução da área basal (m²) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador

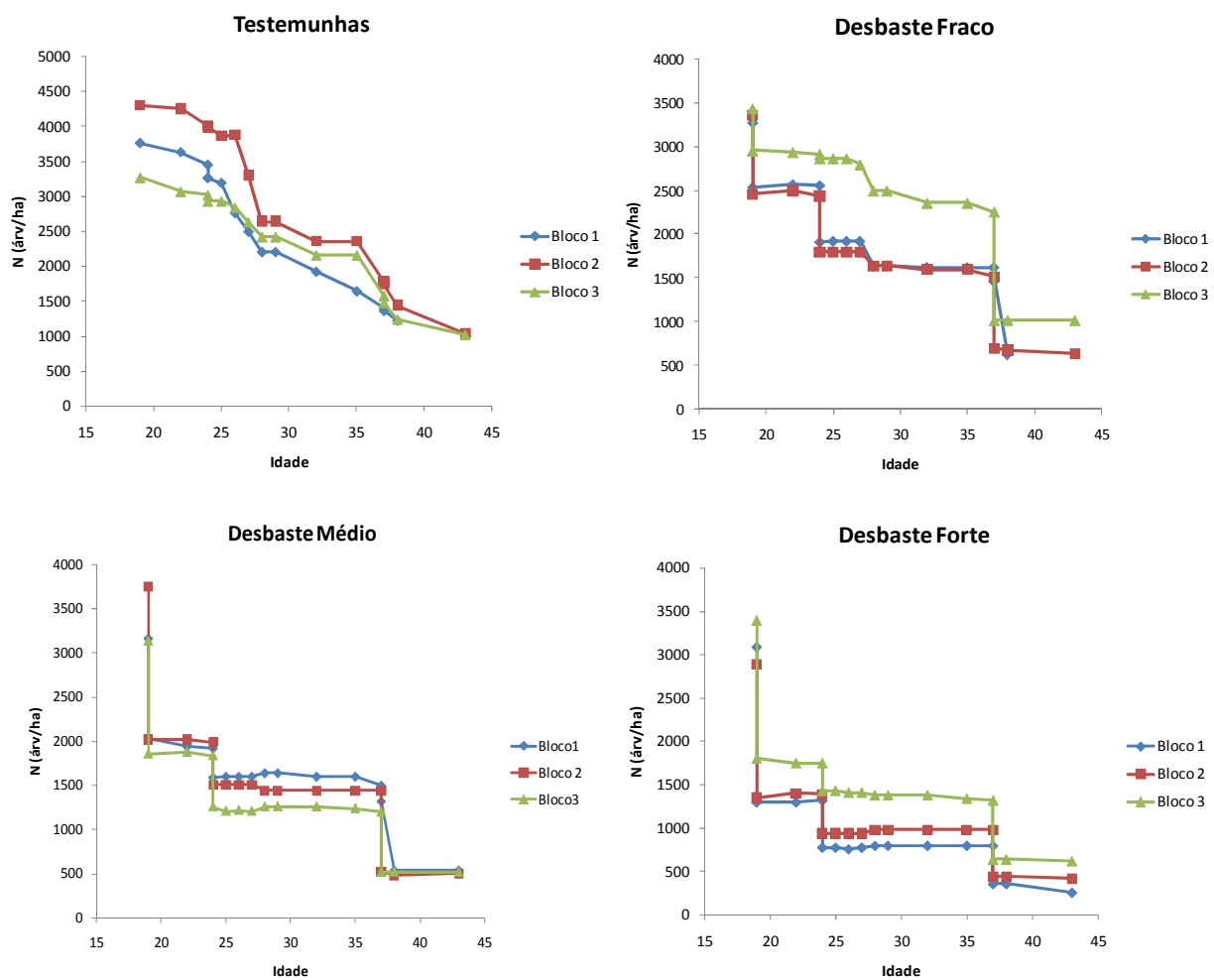


Fig. 6 - Evolução da Densidade (n.º de árvores/ha) para os diferentes tratamentos do ensaio de São Salvador

2.2.1.2. Alcácer do Sal

O ensaio “Alcácer do Sal”, de desbaste e desramas, foi instalado em 1986 num povoamento semeado em linhas em 1977. Situa-se na proximidade da povoação do Carvalhal, próximo de Alcácer do Sal. O delineamento experimental é factorial com quatro tratamentos para o grau de desbaste (fraco, médio, forte e testemunhas) e três níveis para a desrama (ausência, um andar e dois andares de desrama) (Freire 2002; Páscoa 2001). Os tratamentos foram distribuídos aleatoriamente pelas parcelas de cada bloco de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4 - Tratamentos aplicados a cada parcela do Ensaio de Alcácer do Sal.

Bloco	Parcela	Tratamento
1	1	Testemunha x desrama de um andar
	2	Testemunha x desrama de dois andares
	3	Desbaste Forte x ausência de desrama
	4	Desbaste Forte x desrama de um andar
	5	Desbaste Médio x desrama de dois andares
	6	Desbaste Forte x desrama de dois andares
	7	Desbaste Fraco x desrama de um andar
	8	Testemunha x ausência de desrama
	9	Desbaste Fraco x ausência de desrama
	10	Desbaste Fraco x desrama de dois andares
	11	Desbaste Médio x desrama de um andar
	12	Desbaste Médio x ausência de desrama
2	13	Desbaste Médio x ausência de desrama
	14	Desbaste Forte x ausência de desrama
	15	Desbaste Fraco x desrama de um andar
	16	Desbaste Forte x desrama de um andar
	17	Desbaste Médio x desrama de dois andares
	18	Desbaste Fraco x ausência de desrama
	19	Desbaste Forte x desrama de dois andares
	20	Testemunha x desrama de dois andares
	21	Desbaste Médio x desrama de um andar
	22	Testemunha x desrama de um andar
	23	Desbaste Fraco x desrama de dois andares
	24	Testemunha x ausência de desrama

A evolução de algumas variáveis do povoamento encontram-se ilustradas nas figuras 7 a 11, para as médias de cada tratamento de desbaste.

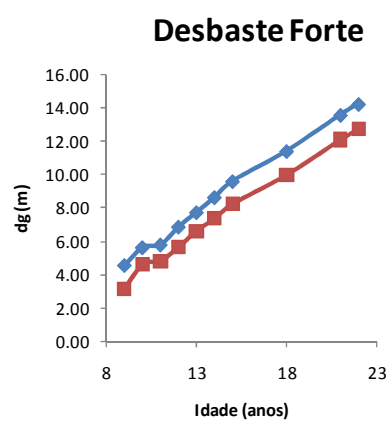
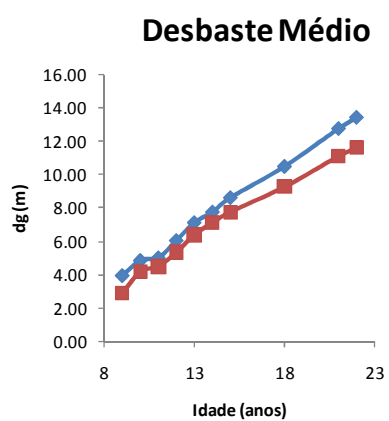
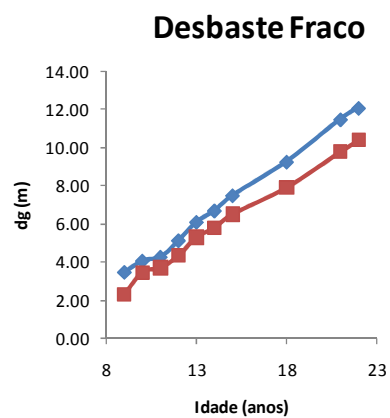
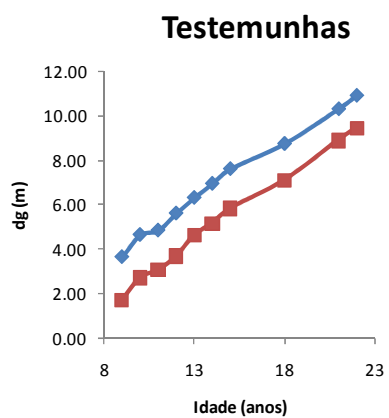


Fig. 7 - Evolução do diâmetro quadrático médio (dg) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal

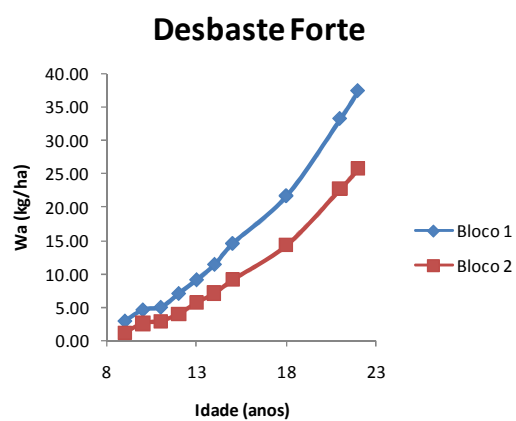
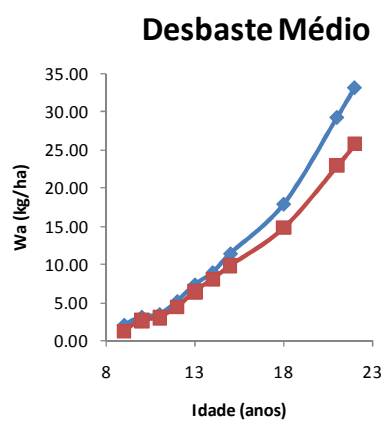
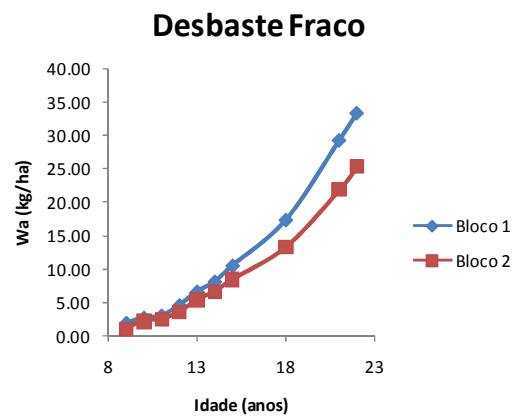
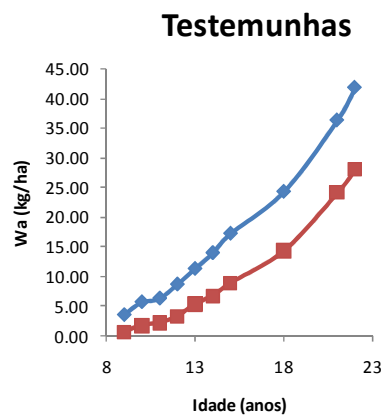


Fig. 8 - Evolução da biomassa acima do solo (W_a) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal

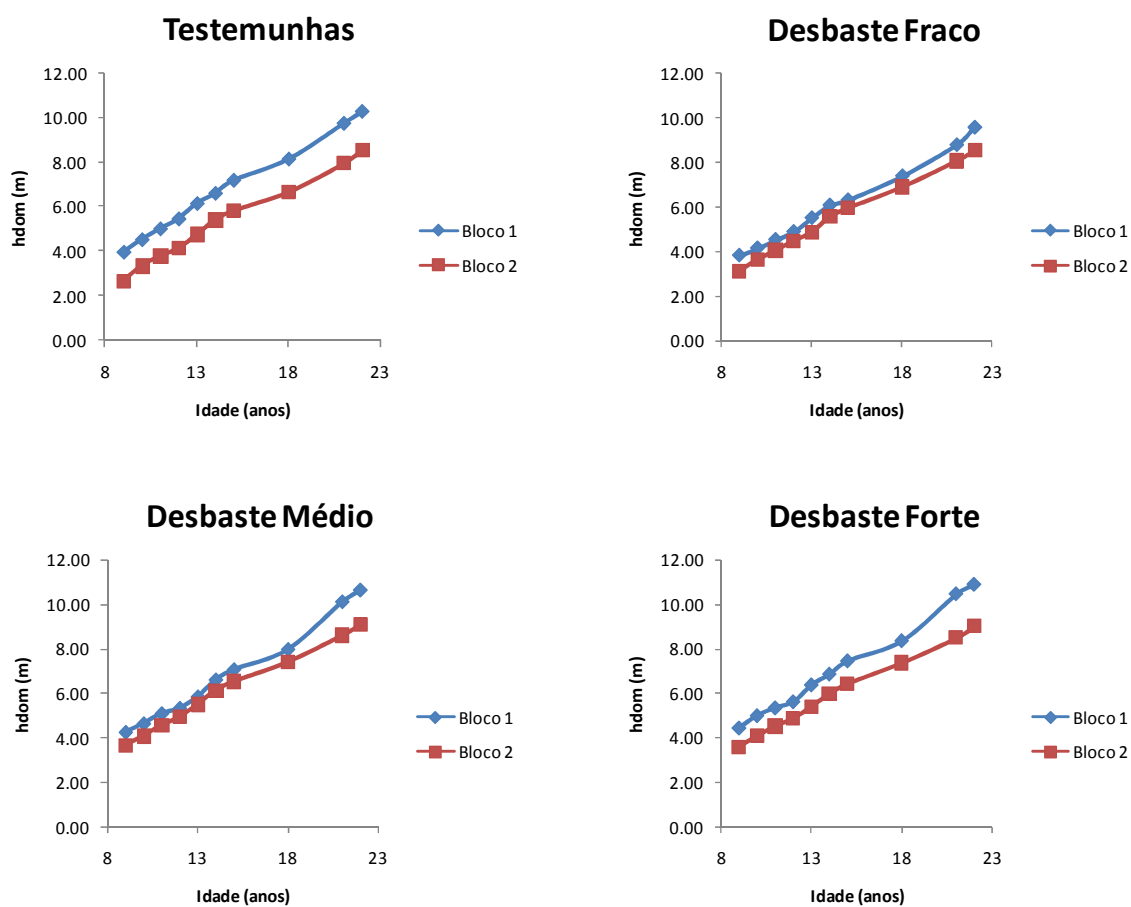


Fig. 9 - Evolução da altura dominante (hdom) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal

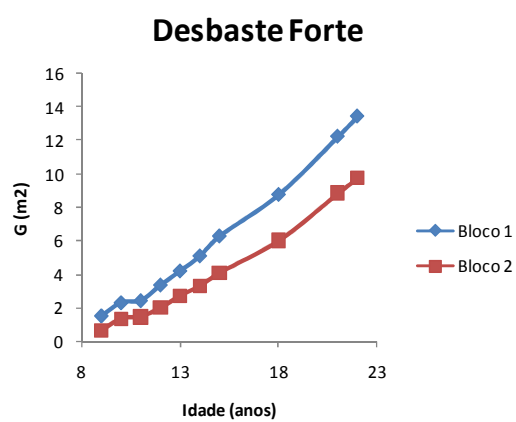
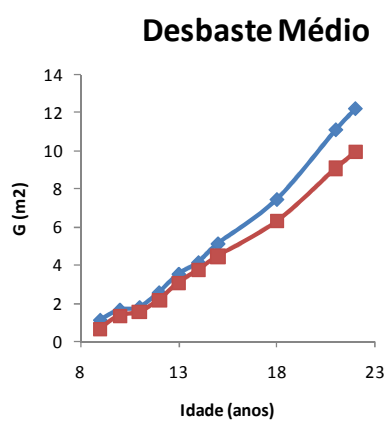
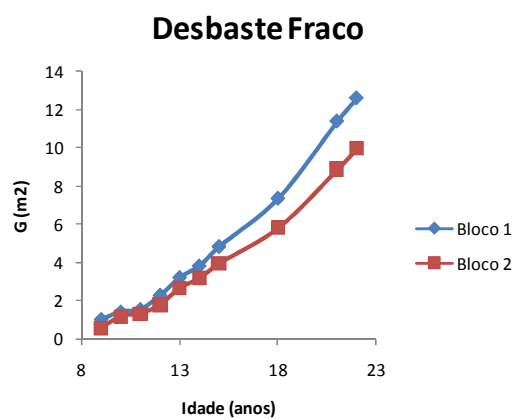
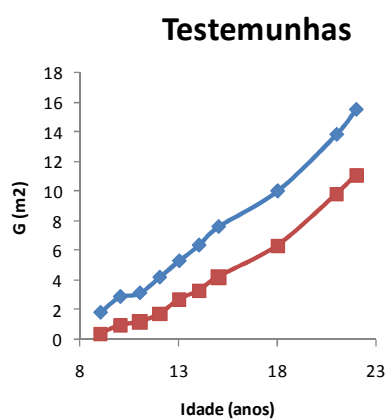


Fig. 10 - Evolução da área basal (G) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal

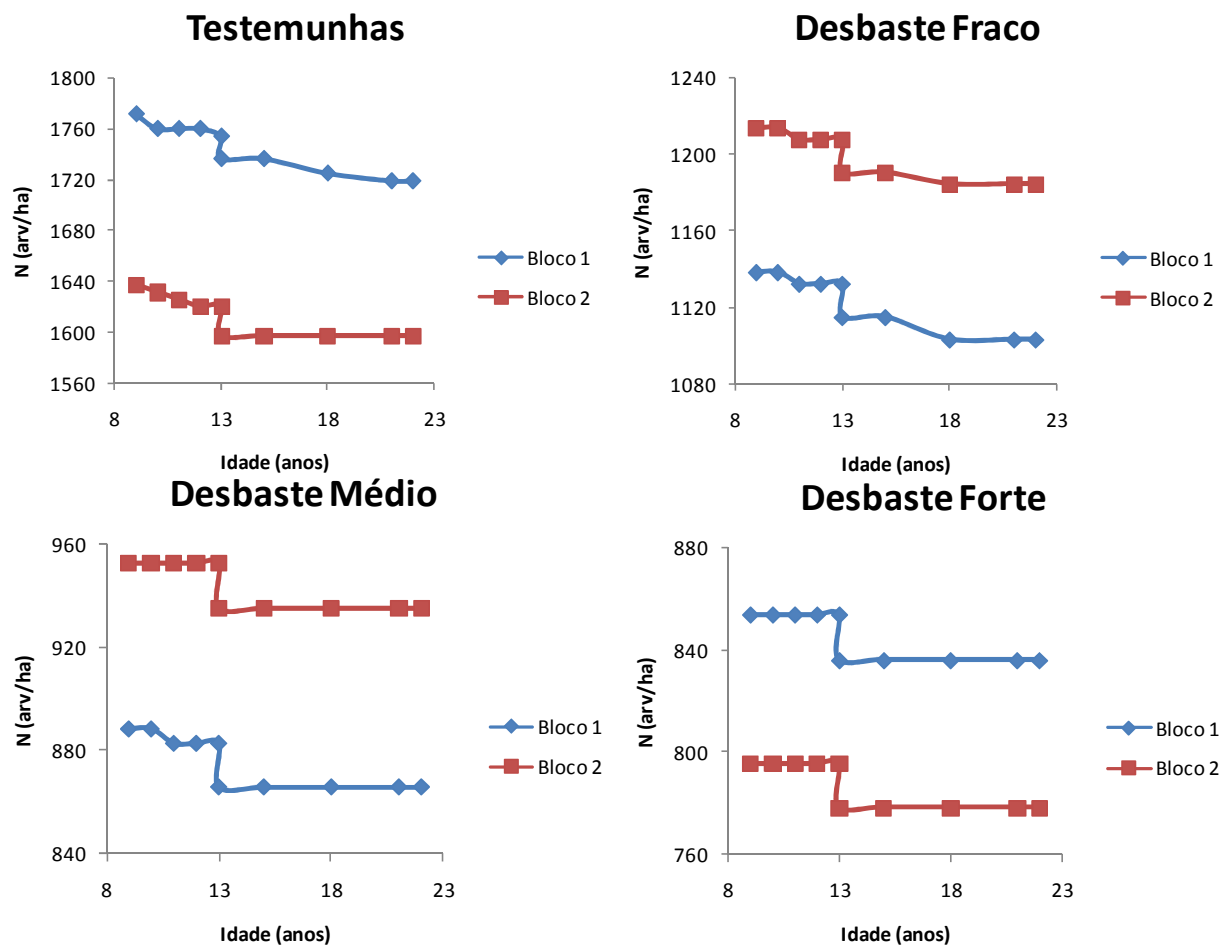


Fig. 11 - Evolução da densidade (N) para os diferentes tratamentos do ensaio de Alcácer do Sal

2.3. Estrutura e organização dos dados

Os dados provenientes dos ensaios acima descritos foram compilados numa base de dados em *Microsoft Access 2007*, designada *BD_PB_08.dbf*, com o intuito de estruturar, armazenar e utilizar os mesmos para efeitos de modelação.

A estrutura relacional da base de dados, representada na figura 12, é constituída por três tipos de tabelas:

- *TC_nome_tabela* - listam as características da parcela ou da árvore;
- *TD_nome_tabela* - descrevem o ensaio;
- *TM_nome_tabela* - armazenam as medições efectuadas ao longo do tempo nas árvores.

Existem várias tabelas auxiliares descritivas dos códigos utilizados em toda a base de dados. O nome destas tabelas começam pelas iniciais TC. Existem seis tabelas “TC”:

TC_codarv – Código relativo à localização da árvore, se se encontra na bordadura ou na parcela útil.

TC_codensaios – Código dos Ensaios

TC_codest – Código de estado da árvore (Se está em bom estado de saúde, se tem problemas fitossanitários, se é bifurcada, etc.)

TC_codmed – Código de medição que dá a informação das variáveis que foram medidas na árvore, se o foi medido apenas o diâmetro à altura do peito (dap), ou apenas a altura, etc.

TC_codpar – Código da parcela

TC_codtrat – Código do tratamento, dá a indicação que tratamento foi utilizado naquela parcela.

(Ver anexo 1 com a descrição pormenorizada dos códigos utilizados)

Optou-se por criar duas tabelas descritivas do ensaio, a “TD_Ensaio” e a “TD_arvores”. A “TD_Ensaio” descreve as características do ensaio que não se alteram ao longo do tempo, nomeadamente o ano em que este foi instalado, qual o tratamento aplicado a cada uma das suas parcelas, altitude, declive, área útil, número de árvores dominantes e coordenadas geográficas quando estas existiam. A tabela “TD_arvores” detém igualmente características da árvores que não se alteram ao longo do tempo, como sejam a sua localização (se é uma árvore de bordadura ou se está na área útil), a que bloco e parcela pertencem e as coordenadas polares ao centro da parcela sempre que estas foram tiradas no campo.

Por fim, existe a tabela “TM_Medicoes” que contém os dados obtidos no campo para as árvores, nomeadamente o diâmetro à altura do peito, altura, o seu estado sanitário e o ano em que a medição foi feita.

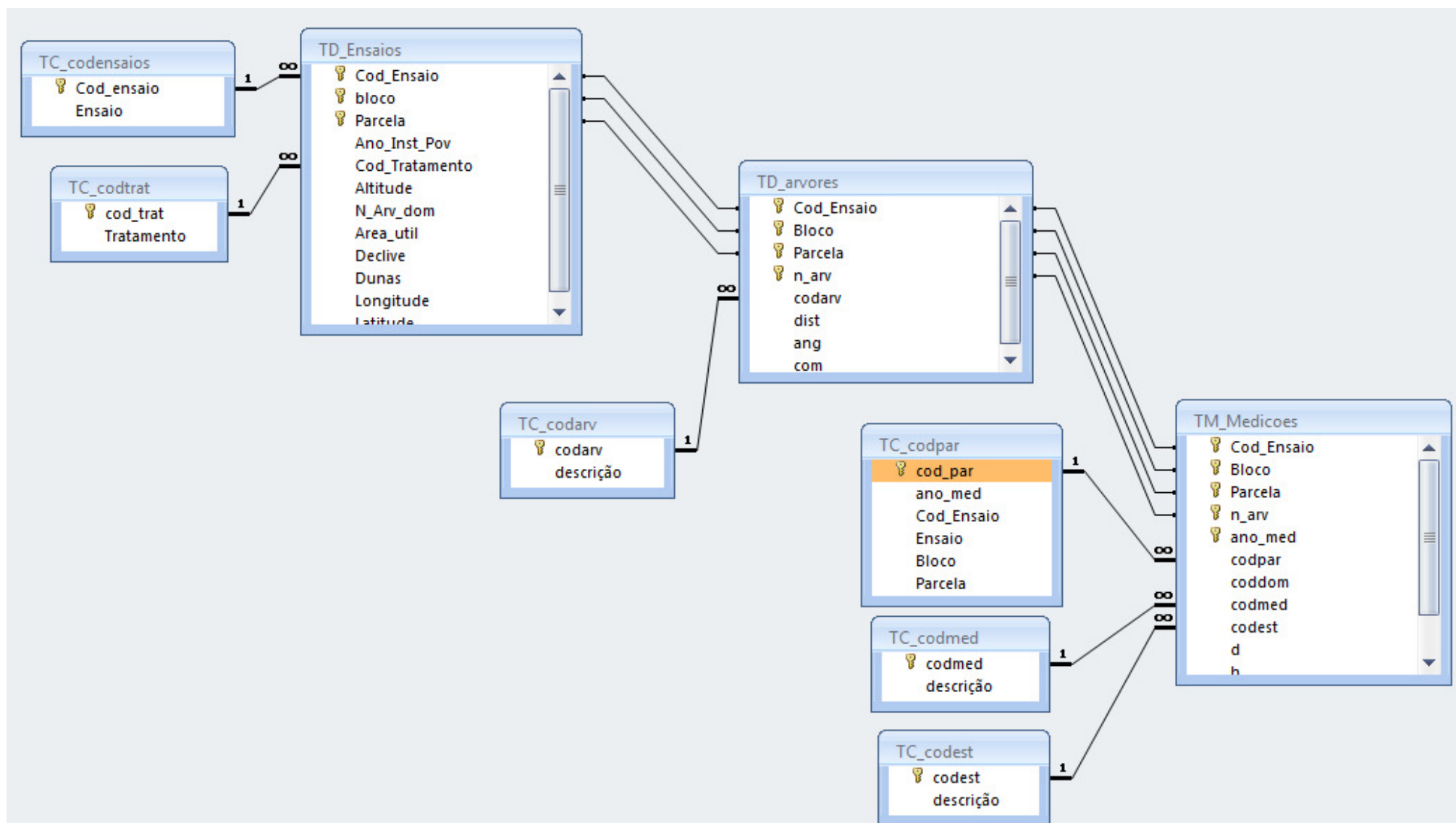


Fig. 12 – Relações entre as tabelas existentes na base de dados de pinheiro bravo.

2.4. Calibração

Calibração é o processo através do qual os valores dos parâmetros são ajustados de forma a que o modelo se aproxime dos dados reais (Zeigler *et al.* 2000). O processo de calibração envolve correr o modelo e comparar os resultados obtidos (estimados) com os valores observados. Os valores dos parâmetros estimados são então ajustados tantas vezes quantas as necessárias até se obter o resultado desejado. Ajustamentos sucessivos dão origem, regra geral, a bons resultados. Quantos mais dados observados houver, mais precisa será a calibração. Embora o modelo possa ser calibrado com um único conjunto de dados para uma idade em particular, é preferível utilizar séries temporais de dados (Landsberg *et al.* 2003).

No presente trabalho a calibração do 3-PG foi feita usando séries de dados observados ao longo do tempo, tais como a acumulação de biomassa e as condições do clima e solo (edafoclimáticas) dos locais em estudo. Com alguns dados de inicialização recorreu-se a um processo iterativo de forma a que os valores dos parâmetros se aproximassem aos valores observados.

Os dados de inicialização, como é exemplo a latitude, índice de fertilidade, número de árvores por hectare iniciais e a água disponível no solo são, à partida, fáceis de se obter. Porém, o índice de fertilidade poderá representar um pequeno desafio, uma vez que o seu valor apresenta um grau de incerteza elevado. Assim sendo, este pode ser visto como mais um parâmetro a ajustar/calibrar com base no conhecimento dos solos e dentro de determinados limites ($\pm 0,1$ ou $0,2$ unidades) de forma a fazer coincidir os valores observados com os estimados. Alterações no índice de fertilidade afectam a produção de biomassa acima do solo e da alocação de carbohidratos para as raízes. Quanto menor for o índice de fertilidade, mais carbohidratos irão ser alocados para as raízes.

De forma a se obter resultados viáveis, o processo de atribuição de parâmetros deverá, obrigatoriamente, ter por base uma boa compreensão do modelo e seguir a metodologia proposta por (Sands 2004). De acordo com o autor dever-se-á começar por atribuir valores aos parâmetros que sejam obtidos por medição directa, ou que assumam valores padrão para a espécie em causa, podendo utilizar-se valores por analogia com outras espécies. De

seguida, identificam-se os parâmetros que se obtêm através dos dados ou por modelação de uma determinada característica em estudo (ex: produção de folhada), podendo também ser atribuídos valores de espécies relacionadas já conhecidos. Por fim, os parâmetros que não são possíveis de obter dos dados ou por observação directa, deverão ser ajustados de forma a otimizar os valores estimados em relação aos observados. Este último procedimento exige um conhecimento sólido sobre os limites de variação dos parâmetros de forma a que estes não percam o seu sentido fisiológico.

Tendo por base esta abordagem, os parâmetros podem ser classificados em “classes de estimativa” e por “classes de sensibilidade”, de acordo com a metodologia a utilizar para a atribuição de valores (Quadro 5). Podem ainda ser classificados de acordo com o maior ou menor efeito que a alteração do valor tem nos resultados do modelo (Quadro 6).

Quadro 5 – Classes de estimativa que podem ser atribuídas aos parâmetros (Sands 2004)

Classe de estimativa		Descrição
Defeito	D	Pode ser atribuído um valor genérico, baseado, por exemplo, numa outra espécie ou de conhecimento prévio.
Observado	O	Pode ser medido directamente (ex. análise de trocas gasosas)
Ajustado	A	Determinado por análise dos dados (ex. regressão linear)
Estimado	E	Só pode ser estimado indirectamente (ex. ajustando o seu valor de forma a otimizar os resultados)

Quadro 6 – Classes de sensibilidade que podem ser atribuídas aos parâmetros (Sands 2004)

Classe de Sensibilidade		Descrição
Baixa	L	Os resultados são essencialmente independentes do valor do parâmetro.
Média	M	Os resultados dependem moderadamente do valor do parâmetro.
Elevada	H	Os resultados são fortemente dependentes do valor do parâmetro, ou a sua sensibilidade varia significativamente entre estações.

Esta classificação foi feita com base nas espécies *E. globulus* e *E. grandis* e não tem o intuito de ser universal. No entanto, pode servir como linha de orientação na atribuição de valores para novas espécies. Com base nestas orientações far-se-á uma descrição de como os valores dos parâmetros para a espécie *Pinus pinaster* foram obtidos.

Todos os parâmetros existentes no 3PG podem ser alterados de forma a modificar os resultados do modelo, mas o procedimento normal é usar valores padrão disponíveis quer em bibliografia, quer em estudos feitos para a espécie que se pretende calibrar, para o maior número de parâmetros possível. Se houver muita flexibilidade na atribuição de valores, torna-se difícil determinar quais os factores que estão efectivamente a condicionar o crescimento e as diferenças obtidas.

Recorreu-se então aos dados das parcelas testemunha dos ensaios de São Salvador e Alcácer do Sal para se proceder à calibração do modelo. Estes dois ensaios diferem muito entre si e representam classes de qualidade, de idade e de compassos muito diferentes. Em traços largos, o ensaio de São Salvador é de melhor qualidade e foi medido com idade acima dos 20 anos. O ensaio de Alcácer do Sal tem um índice de qualidade baixo e apresenta uma idade muito mais jovem. Com este conjunto de dados abrange-se uma grande variedade de situações, o que tem aspectos positivos e menos positivos, que irão ser reflectidos na discussão do presente estudo.

A calibração foi feita recorrendo a um ficheiro auxiliar de *Microsoft Excel*, criado com o intuito de facilitar a observação da influência que a alteração dos valores de alguns parâmetros tem nas predições do modelo. Neste ficheiro a alteração de apenas um parâmetro é visível automaticamente sem ter que se correr o modelo, facilitando o processo de calibração. Recorreu-se, por vezes, à ferramenta “Solver” do *Microsoft Excel* de forma a minimizar as diferenças entre os valores observados e os estimados.

2.5. Parâmetros do modelo

2.5.1. Alocação de biomassa e turnover

2.5.1.1. Alocação de biomassa

A alocação de carboidratos é feita com base nas dimensões da árvore média. O coeficiente que determina a alocação para as raízes (η_r) é calculado em primeiro lugar com as devidas restrições de nutrição e humidade (água disponível no solo). A alocação para o tronco e folhas baseia-se no rácio das derivadas ($p_{f,s}$) das equações alométricas da árvore ($w_i = a_i d_i^n$) que calculam a biomassa de folhas (w_f) e do tronco e ramos (w_s) em função do diâmetro à altura do peito (d) (Landsberg *et al.* 2003).

Os rácios de alocação de biomassa η_i são dados por:

$$\eta_R = \frac{\eta_{Rx}\eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rx} - \eta_{Rn})m\varphi}$$

$$\eta_S = \frac{1 - \eta_R}{1 + P_{FS}}$$

$$\eta_F = P_{FS}\eta_S$$

onde η_R e η_{Rx} são o rácio mínimo e máximo de alocação para as raízes e o P_{FS} é o rácio entre as alocações para as folhas e para os materiais lenhosos, e, m determina o efeito da fertilidade da estação na alocação através de:

$$m = m_0 + (1 - m_0)FR,$$

sendo m_0 um parâmetro. FR varia entre zero e um.

O rácio P_{FS} é dado por uma relação alométrica função do diâmetro à altura do peito (d):

$$p_{FS} = a_p d^{n_p}$$

e a biomassa da parte lenhosa w_s (tronco+ramos+casca em kg) é dada por:

$$W_S = a_s d^{n_s}$$

onde a_p e n_p são expressos em termos dos valores p_2 e p_{20} para diâmetros de 2 e 20 cm.

$$a_p = \frac{\ln\left(\frac{pFS20}{pFS2}\right)}{\ln(10)}$$

$$n_p = \frac{pFS2}{2^{ns}}$$

Ao calibrar o 3PG o P_{FS} deve ser obtido para dois valores de d , que normalmente são 2 e 20 cm (P_{FS2} e P_{FS20}). Os parâmetros P_{FS2} e P_{FS20} (Quadro 7) apresentam uma elevada sensibilidade e devem ser ajustados até que o índice de área foliar (LAI) corresponda aos valores observados no campo. No presente trabalho, o P_{FS2} manteve-se igual ao utilizado por Landsberg *et al.*, 2001 para a espécie *Pinus radiata*, enquanto o P_{FS20} foi ajustado para um valor que satisfazia os valores observados.

As variações de biomassa nas diferentes componentes são expressas pelas seguintes relações:

$$\Delta W_F = \eta_F P_n - \gamma_F W_F \Delta t - m_F \left(\frac{W_F}{N} \right) \Delta N$$

$$\Delta W_R = \eta_R P_n - \gamma_R W_R \Delta t - m_R \left(\frac{W_R}{N} \right) \Delta N$$

$$\Delta W_S = \eta_S P_n - m_S \left(\frac{W_S}{N} \right) \Delta N$$

onde,

P_n – Produtividade primária líquida (PPL);

η_i – fracção da PPL alocada para a componente i ;

$\gamma_F(\text{dia}^{-1})$ – é a taxa de queda de folhada

$\gamma_R(\text{dia}^{-1})$ – é a taxa de turnover de raízes

N – é o número de árvores por hectare

m_i – fracção de biomassa da árvore média (W_i/N) na componente i que é perdida quando uma árvore morre.

Uma vez que os valores a_s e n_s (Quadro 7) são utilizados para o cálculo do diâmetro a partir da biomassa média da parte lenhosa, estes devem, se possível, ser baseados em dados experimentais. Sendo as equações do tipo não-linear, pequenas variações nos valores podem causar diferenças muito grandes nos valores de diâmetro ou área basal. Uma vez estabelecidos, estes não devem ser alterados por calibração (Landsberg *et al.* 2003).

O autor sugere três abordagens alternativas para estimar os parâmetros α_{Cx} , p_2 , p_{20} , η_{Rn} e η_{Rx} consoante a informação disponível (assumindo que os parâmetros que não estão a ser estimados possuem valores lógicos):

1. Se existem dados de biomassa e a produção não está limitada por condições da estação (principalmente fertilidade e água no solo): colocar todos os modificadores de crescimento (f_i) iguais a 1 e estimar α_{Cx} , p_2 , p_{20} , η_{Rn} e η_{Rx} por ajustamento aos valores observados de biomassa;
2. Atribuir valores plausíveis aos modificadores f_i e usar os valores de biomassa das estações disponíveis, com ou sem limitações, para estimar α_{Cx} , p_2 , p_{20} , η_{Rn} e η_{Rx} por ajustamento aos valores observados. Os valores de f_i poderão ter que ser então ajustados iterativamente.
3. Atribuir o valor 1 a todos os modificadores f_i e depois estimar os valores de p_2 , p_{20} , η_{Rn} e η_{Rx} comuns a todas as estações disponíveis e ajustar α_{Cx} para cada estação. Os valores específicos de α_{Cx} são então utilizados como dados “observados” para atribuir ou estimar valores para os parâmetros f_i e o verdadeiro valor de α_{Cx} .

No presente trabalho recorreu-se aos dados provenientes do projecto FORSEE⁴, no âmbito do qual se juntaram dados de 112 árvores abatidas, nas quais foi determinada a biomassa das diferentes componentes, para se ajustar uma equação à curva que relaciona a biomassa das partes lenhosas acima do solo com o diâmetro (Fig. 13). Variações nestes valores reflectem diferenças na forma das árvores e na altura. A equação em causa incorpora os efeitos da altura e da forma do tronco (Landsberg *et al.* 2003). Os valores destes dois

⁴ FORSEE: Rede europeia de zonas piloto para a avaliação de critérios e indicadores de sustentabilidade florestal (FEDER-INTERREG IIIB - *Espace Atlantique*)

parâmetros foram obtidos por ajustamentos aos dados observados, recorrendo ao procedimento NLIN do SAS. Para garantir a propriedade de homogeneidade da variância dos erros foi necessário utilizar uma regressão ponderada. A normalidade foi conseguida com recurso a regressão robusta utilizando a função de Huber.

As árvores foram abatidas em locais diferentes e apresentam diâmetros que variam entre os 3,9 e os 67,5 cm. A curva obtida tem a seguinte equação:

$$y = a_s d^{n_s}$$

Sendo a_s e n_s igual a 0,0188 e 2,8609 respectivamente (Fig. 13).

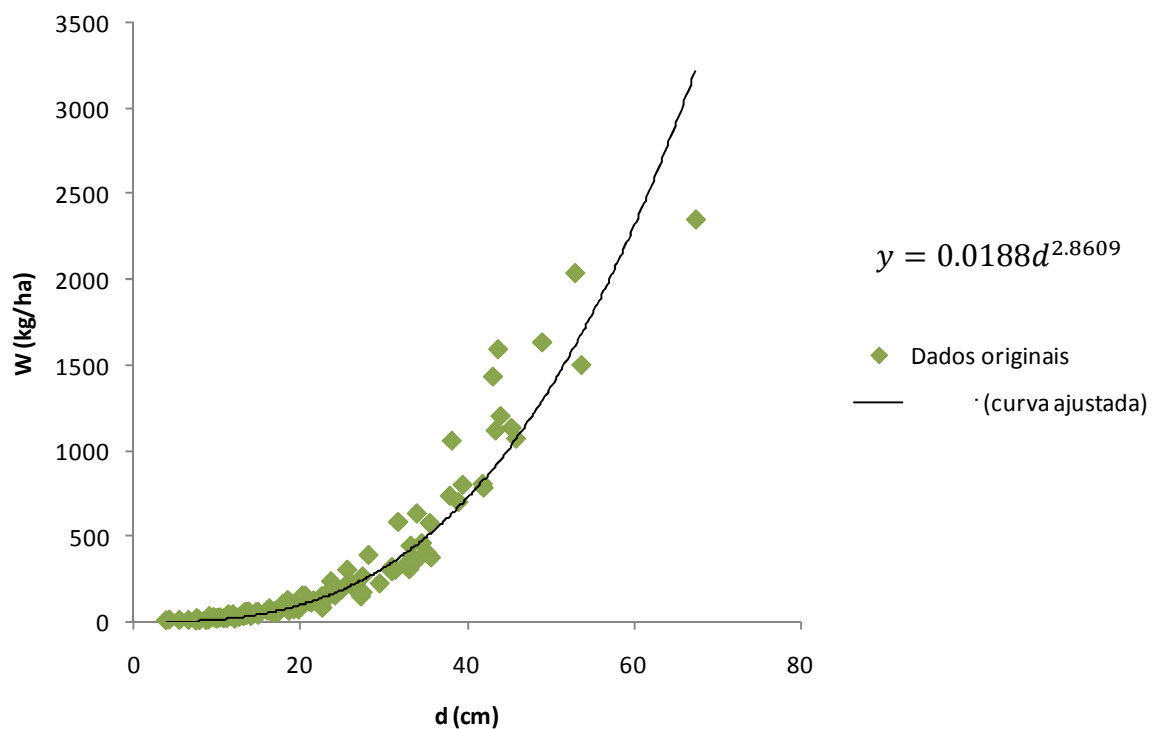


Fig. 13 – Curva ajustada à relação entre o diâmetro à altura do peito (d) e a biomassa total das partes lenhosas acima do solo (Ws)

Os parâmetros η_{Rx} e η_{Rn} (Quadro 7) têm uma sensibilidade mediana e podem ser observados ou estimados. Por observação dos dados disponíveis, chegou-se aos valores de 0.33 e 0.15 respectivamente.

2.5.1.2. Queda de Folhada e “root turnover”

A queda de folhada é calculada numa base mensal como uma fracção da biomassa de folhas acumulada no período de um ano. Esta taxa mensal é dependente da idade e varia entre o valor de γ_{F0} , para povoamentos jovens, e γ_{Fx} . O modelo pressupõe que a taxa é constante ao longo do ano, pelo que é expressa como uma fracção da massa total de folhas que existe em cada mês (Landsberg *et al.* 2003):

$$\gamma_F(t) = \frac{\gamma_{F1}\gamma_{F0}}{\gamma_{F0} + (\gamma_{F1} - \gamma_{F0})e^{-\left(\frac{t}{t_{\gamma F}}\right)\ln\left(1+\frac{\gamma_{F1}}{\gamma_{F0}}\right)}}$$

No caso da espécie em estudo, a média de vida de uma folha na árvore é de dois a três anos (Porté *et al.* 2000), isso representa uma perda anual de 33% a 50%, o equivalente a $0.33/12=0.0275$ ou $0.5/12=0.0417$ por mês. Desta forma, o parâmetro γ_{Fx} assume o valor de 0.025, o que vai ao encontro de dos valores obtidos por (Cortez 1996).

Os parâmetros γ_{F0} e $t_{\gamma F}$ (Quadro 7), deveriam ser obtidos a partir dos dados. Porém, os dados não continham a informação necessária para o cálculo dos mesmos, pelo que lhes foi atribuído o valor obtido para a espécie *P. radiata*.

2.5.2. Produtividade primária líquida

A produtividade primária líquida (NPP, $\text{t ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) é calculada a partir da radiação solar interceptada, determinada pelo índice de área foliar (L) e pela radiação incidente acima do copado, através da equação:

$$NPP = 0.552\alpha_c Y(1 - e^{-kL/\zeta})\zeta\bar{Q}\Delta t$$

onde,

\bar{Q} - é a radiação solar global média diária acima do copado ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

α_c - eficiência quântica do copado (mol mol^{-1})

ζ - é o grau de coberto

Δt - período de tempo (em dias)

k- coeficiente de extinção da luz

Y – constante do rácio entre NPP e GPP

O factor de 0.552 combina a conversão da radiação solar global em radiação fotossinteticamente activa (PAR – 2.3 mol MJ^{-1}), de mol de carbono (C) em madeira ($24 \text{ g}_{\text{DM}} \text{mol}^{-1}$), e gm^{-2} em t ha^{-1} (10^{-2}).

O índice de área foliar do povoamento é então dado por:

$$L=0.1\sigma W_F$$

Onde,

σ – área foliar ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)

0.1 – factor de conversão de t ha^{-1} para kg m^{-2}

W_F – biomassa de folhas por unidade de área do solo (kg m^{-2})

A maioria dos valores de parâmetros necessários para calcular a produtividade primária líquida (NPP) são derivados do conhecimento do comportamento da espécie em causa, ou são valores de referência que se admitem ser adequados a uma grande variedade de espécies.

2.5.2.1. Modificador da temperatura

Os limites de temperatura (T_{\min} , T_{opt} e T_{\max} – Quadro 7) são estimativas baseadas no conhecimento da distribuição geográfica da espécie (Fig. 14) e dos seus requisitos ambientais. Porém, o parâmetro T_{opt} tem alguma influência no crescimento, uma vez que a função de resposta à temperatura tem um papel determinante no modelo. A temperatura condiciona o crescimento através da redução da eficiência quântica, podendo levar a taxas de crescimento próximas de zero.

Os parâmetros T_{\min} e T_{opt} foram atribuídos de acordo com os conhecimentos sobre a distribuição da espécie, ao passo que T_{\max} foi ajustada de forma a que os valores estimados se aproximassem dos observados/calculados.

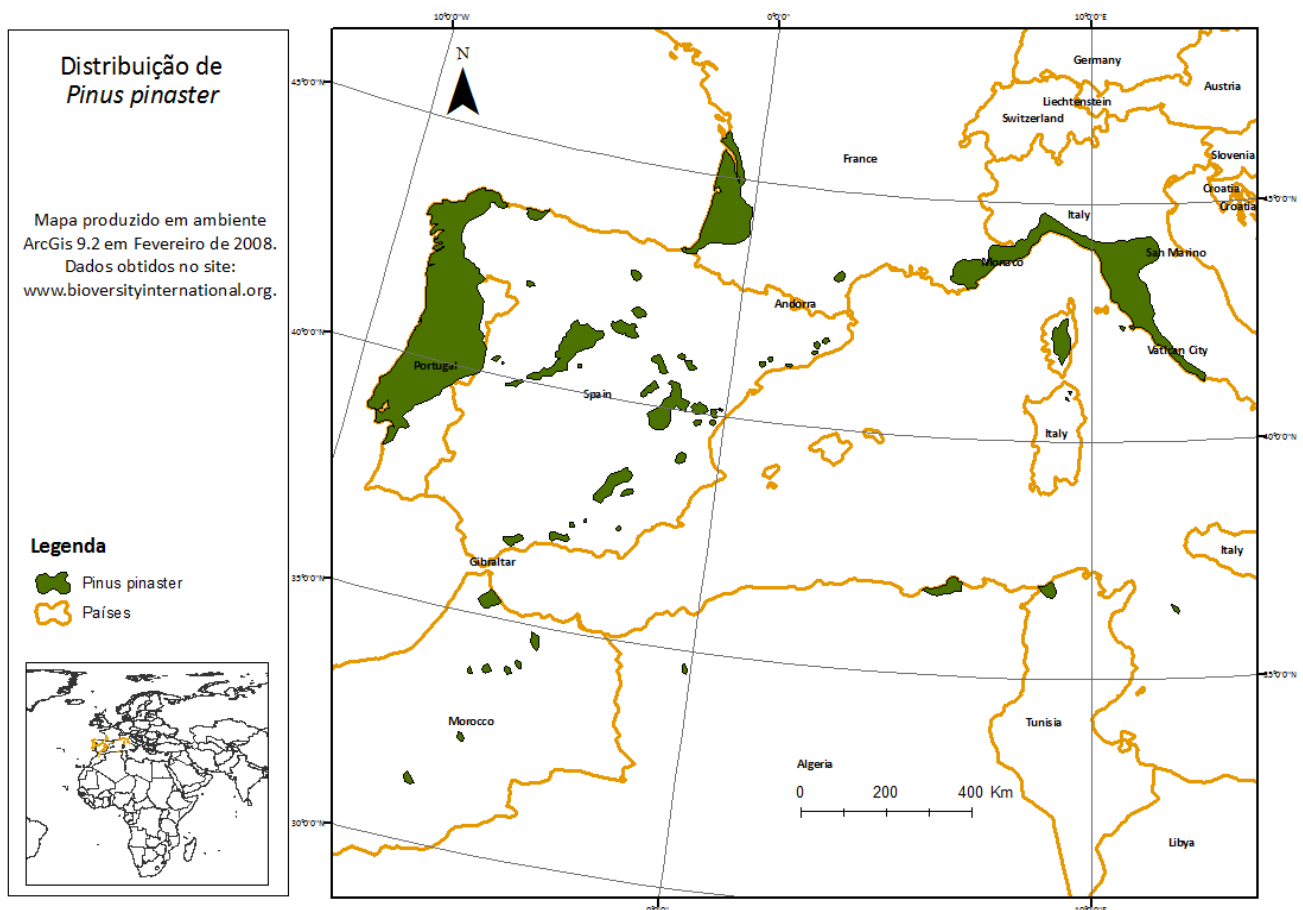


Fig. 14 – Mapa de distribuição de *Pinus pinaster* (Fonte: www.biodiversityinternational.org – Euforgen)

2.5.2.2. Modificador da geada

O parâmetro k_f (Quadro 7) apresenta uma sensibilidade baixa e pode ser atribuído um valor por defeito. Uma vez que a espécie em causa é extremamente sensível a baixas temperaturas, optou-se por atribuir um dia de perda de produção por cada dia de geada. O modelo considera a temperatura apenas para situação de ocorrência de geada, pois assume que não há fotossíntese com temperaturas abaixo de zero (Landsberg 1997b).

2.5.2.3. Modificadores da água do solo e condutância

O balanço hídrico do solo é obtido pela diferença entre a evapotranspiração total mensal (calculada pela equação de Penman-Monteith) e a precipitação mensal, contabilizando a intercepção da chuva pela copa (i_R), que é posteriormente evaporada:

$$\Delta\theta_S = (1 - i_R)R_P + R_I - E_T,$$

Onde i_R é a fracção de precipitação interceptada e, subsequentemente, evaporada do copado. A intercepção aumenta com o LAI. Qualquer excesso é perdido por escoamento superficial ou por drenagem do solo.

A evapotranspiração é calculada usando a equação de Penman-Monteith e depende da radiação solar, do défice de pressão de vapor e da condutância da copa (g_c (m s^{-1})) que, por sua vez, é afectada pela idade do povoamento, défice de pressão de vapor e água disponível do solo através do modificador ϕ . Está positivamente correlacionada com o LAI (Sands 2004):

$$g_c = g_{cx}\phi\min\{1, L/L_{cx}\}$$

Onde L_{cx} é o LAI para o qual a condutância é máxima. Esta equação tem em consideração o facto de que a transpiração ocorre apenas durante as horas de luz e o comprimento do dia é calculado em função da altura do ano e da latitude da estação. No presente trabalho os

valores dos parâmetros g_{Cx} , $LAlg_{cx}$ e k_D mantiveram-se iguais aos valores por defeito do modelo original.

O modelo pode ser inicializado com a capacidade máxima de água, embora não seja obrigatório.

Os parâmetros C_θ e n_θ (Quadro 7), são valores atribuídos por defeito, de acordo com a textura do solo, e são idênticos em todas as espécies (Fig. 15). São valores com base fisiológica.

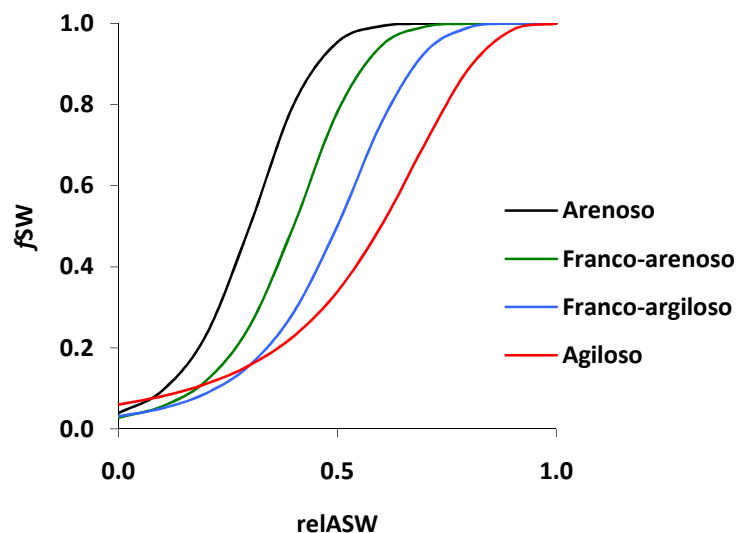


Fig. 15 – Relação entre a água disponível no solo relativa (relASW) e o modificador ambiental f_{SW} .

2.5.2.4. Efeitos da fertilidade

Os efeitos de fertilidade determinam o efeito da fertilidade do solo na eficiência com que a radiação fotosinteticamente activa é utilizada pelas árvores para produzir biomassa e qual a fracção de NPP alocada para as raízes. Os parâmetros deste modificador são geralmente valores atribuídos por observação das características do solo. Porém, neste caso, foram atribuídos os mesmos valores da espécie *P. radiata*, à excepção do parâmetro f_{N0} , que assume o valor 0,5 de forma a que os valores estimados se ajustem aos observados.

2.5.2.5. Modificador de idade

À medida que um povoamento envelhece a sua produtividade primária líquida diminui. A razão pela qual tal acontece não se encontra perfeitamente esclarecida, existindo várias hipóteses para explicar este fenómeno. Os autores do modelo assumem a hipótese de que a condutância hidráulica diminui devido à diminuição da sensibilidade dos estomas e à complexificação do sistema hidráulico, mas outras podem ser consideradas, como são exemplo a acumulação de nutrientes na folhada e o aumento da proporção de tecido heterotófico com a idade. O modelo recorre a equações empíricas que contabilizam a redução da condutância dos estomas à medida que o povoamento envelhece (Landsberg and Waring 1997). Algumas das variáveis do modelo são dependentes da idade através destas relações empíricas. As variáveis em questão são a área foliar específica, a taxa de queda de folhada, a taxa de mortalidade, a fracção da biomassa do tronco que corresponde à casca e ramos e a densidade básica (Sands 2004). Estas variáveis definem a idade à qual o povoamento é considerado maduro. Os valores de n_{Age} e r_{Age} mantiveram-se iguais aos valores por defeito do modelo original, enquanto o valor de t_x foi adaptado à espécie em causa, passando a ser de 75 anos.

2.5.3. Mortalidade e auto-desbaste

A mortalidade num povoamento pode ser independente da densidade (casual ou induzida por stress), ou dependente da densidade (auto-desbaste). Quando a mortalidade é dependente da densidade, é determinada pela Lei dos 3/2 de forma a assegurar que a biomassa do tronco média não ultrapassa o máximo permitido para cada valor de densidade (Sands 2004).

Por cada árvore que morre, uma fracção da biomassa média (m_i) da reserva total de biomassa é removida. Normalmente, $m_i < 1$ porque as árvores que morrem são usualmente dominadas. Assume-se que os valores de m_i são os mesmos para situações de dependência e independência da densidade do povoamento.

Os valores destes parâmetros mantiveram-se iguais aos valores por defeito do modelo original.

2.5.4. Estrutura da copa e processos fisiológicos

2.5.4.1. Área foliar específica

Os parâmetros σ_0 , σ_1 e τ_σ (Quadro 7) deverão ser obtidos por observação directa dos dados. Porém, como não dispúnhamos de dados sobre a área foliar, em Portugal utilizaram-se para os parâmetros σ_0 e σ_1 os resultados obtidos por Porté *et al.* (2000) num estudo realizado com a mesma espécie. Para o parâmetro τ_σ foram feitos ajustamentos iterativos de forma a aproximar os resultados estimados aos observados.

2.5.4.2. Intercepção da radiação

O LAI é determinado a partir da biomassa foliar e de valores da área foliar específica. Assume-se que a radiação fotosinteticamente activa é 0,5 da radiação solar total e o modelo calcula a radiação absorvida através da Lei de Beer. Assume-se que a folhagem se encontra uniformemente distribuída pelo povoamento, o que se aproxima da realidade no momento em que o povoamento se encontra a fechar as copas ou posterior. No entanto, para povoamentos jovens, esta é uma dedução pobre e poderá dar um erro considerável.

Se o LAI for inferior a três, a condutância da copa é calculada como a máxima condutância dos estomas, corrigida para os efeitos do défice de pressão de vapor.

Os parâmetros k e i_{Rx} (Quadro 7) ficaram com os mesmo valores que a espécie *P. radiata*, ao passo que t_c foi ajustado e o L_{ix} foi retirado de estudos realizados por Granier *et al.* (2000).

2.5.4.3. Produção e respiração

Os efeitos ambientais na produção são introduzidos no modelo sob a forma de modificadores adimensionais f_i , que assumem valores entre zero e um e que interagem, matematicamente, com a eficiência quântica do copado através da multiplicação (Sands 2004). Estes modificadores têm em consideração a temperatura média do ar (f_T), dias com

geada por mês (f_f), o déficit de saturação de vapor (f_D), a água disponível no solo (f_θ), a fertilidade da estação (f_N) e a idade do povoamento (f_{age}). Assim sendo,

$$\alpha_c = \alpha_{cx} \varphi f_T f_F f_N$$

$$\varphi = f_{age} \min\{f_D, f_\theta\},$$

Onde φ também afecta a condutância do copado. Em suma:

$$f_T(T_a) = \left(\frac{T_a - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T_a}{T_{max} - T_{opt}} \right)^{(T_{max} - T_{opt}) / (T_{opt} - T_{min})}$$

$$f_F(d_f) = 1 - k_F \left(\frac{d_f}{30} \right)$$

$$f_N(FR) = 1 - (1 - f_{N0})(1 - FR)^{n_{fN}}$$

$$f_D(D) = e^{-k_D D}$$

$$f_\theta(\theta_s) = \frac{1}{1 + [(1 - \theta_s / \theta_{sx}) / c_\theta]^{n_\theta}}$$

$$f_{age}(t) = \frac{1}{1 + [(t / t_x) / r_{age}]^{n_{age}}}$$

Onde,

T_a – temperatura média do ar (°C)

d_f – dias com geada por mês

FR – índice de fertilidade da estação

θ_s – água disponível no solo

Os vários parâmetros (T_{min} , T_{opt} , etc.) já foram descritos anteriormente.

O intervalo de valores que a eficiência quântica do copado (α) pode tomar é definido por medições e observações experimentais. Landsberg *et al.* (2003) assumiu que o valor 0,05 mol C (mol quanta)⁻¹ seria um valor médio para coníferas. No presente trabalho, por falta de

dados disponíveis em Portugal, fez-se uma média dos valores obtidos para as espécies *P. radiata* e *P. sylvestris*, ficando com o valor de 0.0525, o que nos parece ser um valor razoável, dado que não se afasta do valor médio para as coníferas.

De acordo com Landsberg (1997) o rácio entre NPP e GPP é bastante constante para uma variedade de florestas, sendo a média $0,45 \pm 0,05$. No presente trabalho optou-se por usar o mesmo valor da espécie *P. radiata* (0,47).

2.5.5. Outros parâmetros e factores de conversão

2.5.5.1. Fracções dos ramos e do ritidoma

A alocação de biomassa para os ramos e ritidoma são uma parte significativa dos carboidratos, especialmente em idades mais jovens. Os parâmetros p_{BB0} , p_{BB1} e t_{BB} (Quadro 7) assumiram os valores da espécie *P. radiata*, pois não dispúnhamos de informação suficiente para o seu cálculo adequado.

2.5.5.2. Densidade básica

A densidade básica da madeira é um dos mais importantes índices para avaliar a qualidade da madeira. É um parâmetro quantitativo resultante das características químicas e físicas da madeira. É definida como sendo a relação entre o peso de madeira seca em estufa e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras (Shimoyama and Barrichelo 1989).

No presente trabalho, o valor 0,437 foi retirado do estudo realizado por Jorge (2001), onde a densidade da madeira da espécie foi medida.

2.5.6. Factores de conversão

Os parâmetros Q_a , Q_b , gDM_{mol} e $molPAR_{MJ}$ (Quadro 7) são variáveis que assumem valores por defeito e não foram alteradas no presente trabalho.

Quadro 7 – Nome, unidades, valores por defeito e classificação dos parâmetros do 3-PG (Fonte: Sands, 2004). (Classe de estimativa: E – Estimados, O – observados, D – por defeito; Classe de sensibilidade: H – Elevada, M – Média, L – Baixa, veja-se Quadro 2)

Descrição	Símbolo e nome no 3-PG		Unidades	Estação / específico da espécie	Classe de Sensibilidade	Classe de Estimativa	Requisitos dos dados e comentários
Biomass partitioning and turnover							
Allometric relationships & partitioning							
Ratio of foliage:stem partitioning at $d = 2$ cm	p_2	pFS2	-	Species	H	E	Biomassa das folhas ou índice de área foliar (LAI), biomassa do tronco ou d
Ratio of foliage:stem partitioning at $d = 20$ cm	p_{20}	pFS20	-	Species	H	E	
Constant in stem mass v diam. relationship	a_s	stemConst	-	Species	M	O	biomassa do tronco ou d em estações
Power in stem mass v diam. relationship	n_s	stemPower	-	Species	H	O	contrastantes
Maximum fraction of NPP to roots	η_{Rx}	pRx	-	Species	M	O/E	Idealmente dados de biomassa acima e abaixo do solo ou rácios de alocação <i>a priori</i>
Minimum fraction of NPP to roots	η_{Rn}	pRn	-	Species	M	O/E	
Litterfall & root turnover							
Litterfall rate at $t = 0$	γ_{f0}	gammaFO	month ⁻¹	Both	L	D	Queda de folhada observada, SLA e LAI
Litterfall rate for mature stands	γ_{fx}	gammaFx	month ⁻¹	Both	H	O	
Age at which litterfall rate has median value	$t_{\gamma f}$	tgammaF	month	Both	L	E/D	Conhecimento geral das taxas de conversão de raízes
Average monthly root turnover rate	γ_R	gammaR	month ⁻¹	Both	L	D	
Growth modifiers							
Temperature modifier							
Minimum temperature for growth	T_{min}	Tmin	°C	Species	L	D	Dados de crescimento de estações com temperaturas extremas (quente e frio)
Optimum temperature for growth	T_{opt}	Topt	°C	Species	M	E	
Maximum temperature for growth	T_{max}	Tmax	°C	Species	L	D	
Frost modifier							
Number of days production lost for each frost day	k_F	kF	days	Species	L	D	Dados de crescimento de estações muito frias
Fertility modifiers							
Value of m when $FR = 0$	m_0	m0	-	Species	?	O	Bons dados de crescimento de estações sem limitações de nutrição e água E de estações com limitações de nutrição
Value of f_N when $FR = 0$	f_{N0}	fN0	-	Species	M	O	
Power of $(1-FR)$ in f_N	n_{fN}	fNn	-	Species	L	O	
VPD modifier							
Defines stomatal response to VPD	k_D	CoeffCond	mbar	Species	L	D	Dados de condutância obtidos de análises de trocas gasosas

Página | 46

Soil water modifier

Moisture ratio deficit which gives $f_{\theta} = 0.5$	c_{θ}	SWconst	-	Site	H	D	Dados de retenção de água no solo de solos com texturas diferentes
Power of moisture ratio deficit in f_{θ}	n_{θ}	SWpower	-	Site	L	D	

Age modifier

Maximum stand age used to compute relative age	t_x	MaxAge	yr	Species	L	D	Dados de crescimentos de longos períodos de tempo; não relevante para rotações curtas
Power of relative age in f_{age}	n_{age}	nAge	-	Species	L	D	
Relative age to give $f_{age} = 0.5$	r_{age}	rAge	-	Species	L	D	

Conductance

Maximum canopy conductance	g_{Cx}	MaxCond	$m\ s^{-1}$	Species	H	O/E	Dados de condutância obtidos de análises de trocas gasosas
Canopy LAI for maximum canopy conductance	L_{Cx}	LAIgcx	$m^2\ m^{-2}$	Species	L	D	Dados empíricos
Canopy boundary layer conductance	g_B	BLcond	$m\ s^{-1}$	Both	L	D	Conhecimento geral do balanço energético do copado

Stem mortality and self-thinning

Seedling mortality rate ($t = 0$)	γ_{N0}	gammaN0	yr^{-1}	Species	?	O	Séries temporais do número de árvores quando a mortalidade é não-dependente da densidade
Mortality rate for older stands (large t)	γ_{N1}	gammaNx	yr^{-1}	Species	?	O	
Age at which $\gamma_N = \frac{1}{2}(\gamma_{N0} + \gamma_{N1})$	$t_{\gamma N}$	tgammaN	yr	Species	?	O	
Shape of mortality response	$n_{\gamma N}$	ngammaN	-	Species	?	O	
Maximum stem mass per tree at 1000 trees/ha	w_{Sx1000}	wSx1000	kg/tree	Species	L	D	Séries temporais do número de árvores
Power in self thinning law	n_N	thinPower	-	Species	L	D	Baseado em leis de escala e observações
Fractions of mean foliage, root and stem biomass pools per tree on each dying tree	m_F	mF	-	Species	L	D	Baseado em observações de povoamentos que se encontram em auto-desbaste
	m_R	mR	-	Species	L	D	
	m_S	mS	-	Species	L	D	

Canopy structure and processes

Specific leaf area

Specific leaf area at stand age 0	σ_0	SLA0	$m^2\ kg^{-1}$	Species	L	O	SLA observado para povoamentos jovens e maduros
Specific leaf area for mature aged stands	σ_1	SLA1	$m^2\ kg^{-1}$	Species	H		
Age at which specific leaf area = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	τ_{σ}	tSLA	yr	Species	L		

Rainfall interception

Maximum fraction of rainfall intercepted by canopy	i_{Rx}	MaxIntcptn	-	Both	M	D	Requer dados de precipitação acima e abaixo do copado
LAI for maximum rainfall interception	L_{ix}	LAImax-Intcptn	$m^2\ m^{-2}$	Species	L	D	

Light interception, production and respiration

Dados de interceptação de luz, distribuição do

Extinction coefficient for PAR absorption by canopy	k	k	-	Species	M	D	ângulo foliar
Age at full canopy cover	t_c	fullCanAge	yr	Species	M		Observação do desenvolvimento do copado
Maximum canopy quantum efficiency	α_{Cx}	alpha	-	Species	H	E	Dados de crescimento sem limitações de nutrição e de água
Ratio NPP/GPP	Y	Y	-	None	H	D	Baseado em Waring <i>et al</i> (1998)
Wood and stand properties							
Branch & bark fraction							
Branch and bark fraction at stand age 0	p_{BB0}	fracBB0	-	Species	L	O	Dados observados de biomassa de ramos, ritidoma e tronco
Branch and bark fraction for mature aged stands	p_{BB1}	fracBB1	-	Species	L	O	
Age at which $p_{BB} = \frac{1}{2}(p_{BB0}+ p_{BB1})$	t_{BB}	tBB	yr	Species	L	O	
Basic density							
Minimum basic density – for young trees	ρ_0		t m ⁻³	Both	H	O	Densidade da madeira observada em árvores de várias idades e estações
Maximum basic density – for older trees	ρ_1	rhoMax	t m ⁻³	Both	H	O	
Age at which $\rho = \frac{1}{2}$ density of old and young trees	t_ρ	tRho	yr	Both	M	O	
Stem height allometric relationship							
Constant in stem height relationship	a_H	aH	-	Species	?	O	Dados observados de alturas e diâmetros
Power of DBH in stem height relationship	n_{HB}	nHB	-	Species	?	O	
Power of stocking in stem height relationship	n_{HN}	nHN	-	Species	?	O	
Stem volume allometric relationship							
Constant in stem volume relationship	a_V	aV	-	Species	?	O	Dados observados de alturas e diâmetros
Power of DBH in stem volume relationship	n_{VB}	nVB	-	Species	?	O	
Power of stocking in stem volume relationship	n_{VN}	nVN	-	Species	?	O	
Conversion factors							
Intercept of net radiation v solar radiation relationship	Q_a	Qa	W m ⁻²		H	D	Obtido a partir de literatura e experiências fisiológicas
Slope of net radiation v solar radiation relationship	Q_b	Qb	-		H	D	
Molecular weight of dry matter		gDM_mol	gm mol ⁻¹		H	D	
Conversion of solar radiation to PAR		molPAR_MJ	mol MJ ⁻¹		H	D	

2.6. Validação

A avaliação de um modelo é uma parte importante da sua construção e envolve vários passos, incluindo a verificação e a validação. Em modelos de crescimento florestal são geralmente realizados testes qualitativos e quantitativos (Vanclay 1995). Não se pretende aqui avaliar a qualidade do modelo em si, mas sim a calibração obtida, pelo que o termo “validação” consiste em fazer correr o modelo em condições semelhantes às utilizadas para a sua calibração e, comparar os resultados com dados experimentais que não tenham sido utilizados na calibração. Para validar o conjunto de parâmetros obtidos usaram-se as parcelas do ensaio de São Salvador onde foram aplicados desbastes.

O modelo tem a possibilidade de considerar desbastes (Fig. 16), tendo para tal que se fornecer providenciar informação acerca da idade, do número de árvores que fica em povoamento (“stocking”) e qual a proporção de biomassa das diferentes componentes das árvore média (folhas, raízes e tronco, letras F, R e S respectivamente) que saiem no desbaste do respectivo ano.

Run type : SingleSite

Site : Sao Salvador
Species : P. pinaster
Climate data : Clima
Met station : Visou
Title : Sao Salvador

Climatic data base & silvicultural events (1) ...

a) Climate data is read from a climatic data base. The data base is identified by the keywords **Climate data**, and the data set by **Met station**.

b) Silvicultural events are identified by the keywords **Fertility** and **Irrigation**, such that site fertility is run down, and irrigation emulates a period of wet years followed by drought not reflected in the average met data used.

Stand initialisation and site factor data

Year planted = 1962 Latitude = 39
Month planted = January Fertility rating = 0.4
Initial year = 1981 Soil class = s
Initial month = January Maximum ASW = 100
End age = 38 Minimum ASW = 0
Initial WF = 8.69
Initial WR = 17.3
Initial WS = 60.88
Initial stocking = 2540
Initial ASW = 100

Optional parameter block Parameters

Silvicultural events

Thinning				
Age	Stocking	F	R	S
24	1910	0.31	0.61	0.42
37	1460	0.37	0.53	0.32

Output details

Output frequency : a
Output data : FR, Irrig
Output sheet : Details

Fig. 16 – Ilustração das variáveis de inicialização que é necessário fornecer ao modelo 3-PG

Para se poder utilizar estas parcelas na validação é necessário ter a informação do desbaste efectuado e dos respectivos valores de biomassa das várias componentes da árvore. Só desta forma se pode saber a proporção do que saiu em relação ao que ficou em povoamento. A razão pela qual se utilizaram apenas estas parcelas para a validação deve-se ao facto de existir poucos ensaios em Portugal onde tais medições sejam efectuadas.

Uma das técnicas estatísticas disponível para avaliar a performance de um modelo é comparar directamente os valores preditos com os observados e usar uma estatística análoga ao R^2 , denominada por eficiência da modelação (EM):

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

onde,

y_i – valores observados

\hat{y} - valores predictos

\bar{y} - média dos valores observados.

Esta estatística fornece um índice de performance simples com uma escala relativa, onde 1 é um ajustamento perfeito, 0 significa que o modelo não é melhor do que uma simples média e valores negativos indicam um modelo muito pobre (Vanclay 1995).

3. RESULTADOS

3.1 Calibração

Seguindo o método proposto por Sands (2004), os resultados referentes à predição de biomassa das folhas e biomassa acima do solo encontram-se nas figuras 20 e 21.

O conjunto de parâmetros final obtido apresenta uma diferença no parâmetro t_c (Quadro 8). Este parâmetro define a idade à qual o copado fecha. Uma vez que os ensaios utilizados diferem nas suas densidades, estas idades vão variar. Optou-se então por deixar este parâmetro variar de acordo com o povoamento em questão. Assim, a lista de parâmetros finais encontra-se no quadro 8.

Quadro 8 – Nomes, unidades e valores dos parâmetros utilizados no modelo. SS – São Salvador; AS – Alcácer do Sal.

Nome	Unidades	<i>P. pinaster</i>	Nome	Unidades	<i>P. pinaster</i>
pFS2	-	0.8	mS	-	0.2
pFS20	-	0.5	SLA0	m ² /kg	8.68
aS	-	0.0188	SLA1	m ² /kg	6.57
nS	-	2.8609	tSLA	anos	3
pRx	-	0.33	k	-	0.5
pRn	-	0.15	fullCanAge	anos	30/42*
gammaFx	1/mês	0.025	MaxIntcptn	-	0.15
gammaF0	1/mês	0.001	LAImaxIntcptn	-	2.6
tgammaF	meses	36	alpha	molC/molPAR	0.0525
gammaR	1/mês	0.015	Y	-	0.47
Tmin	graus °C	0	MaxCond	m/s	0.02
Topt	graus °C	20	LAIgcx	-	3.33
Tmax	graus °C	35	CoeffCond	1/mBar	0.05
kF	dias	1	BLcond	m/s	0.2
SWconst	-	0.7	fracBB0	-	0.5
SWpower	-	9	fracBB1	-	0.1
m0	-	0	tBB	anos	5
fN0	-	0.6	rhoMin	t/m3	0.437
fNn	-	1	rhoMax	t/m3	0.437
MaxAge	anos	75	tRho	anos	4
nAge	-	4	aH	-	0
rAge	-	0.5	nHB	-	0
gammaNx	%/ano	0	nHN	-	0
gammaN0	%/ano	0	aV	-	0
tgammaN	anos	0	nVB	-	0
ngammaN	-	1	nVN	-	0
wSx1000	kg/árvore	280	Qa	W/m2	-90
thinPower	-	1.7844	Qb	-	0.8
mF	-	0	gDM_mol	gDM/mol	24
mR	-	0.2	molPAR_MJ	mol/MJ	2.3

Legenda: Dados; Bibliografia; Ajustados; Defeito ou *P. radiata*

* - Ensaio de São Salvador = 30; Ensaio de Alcácer do Sal = 42.

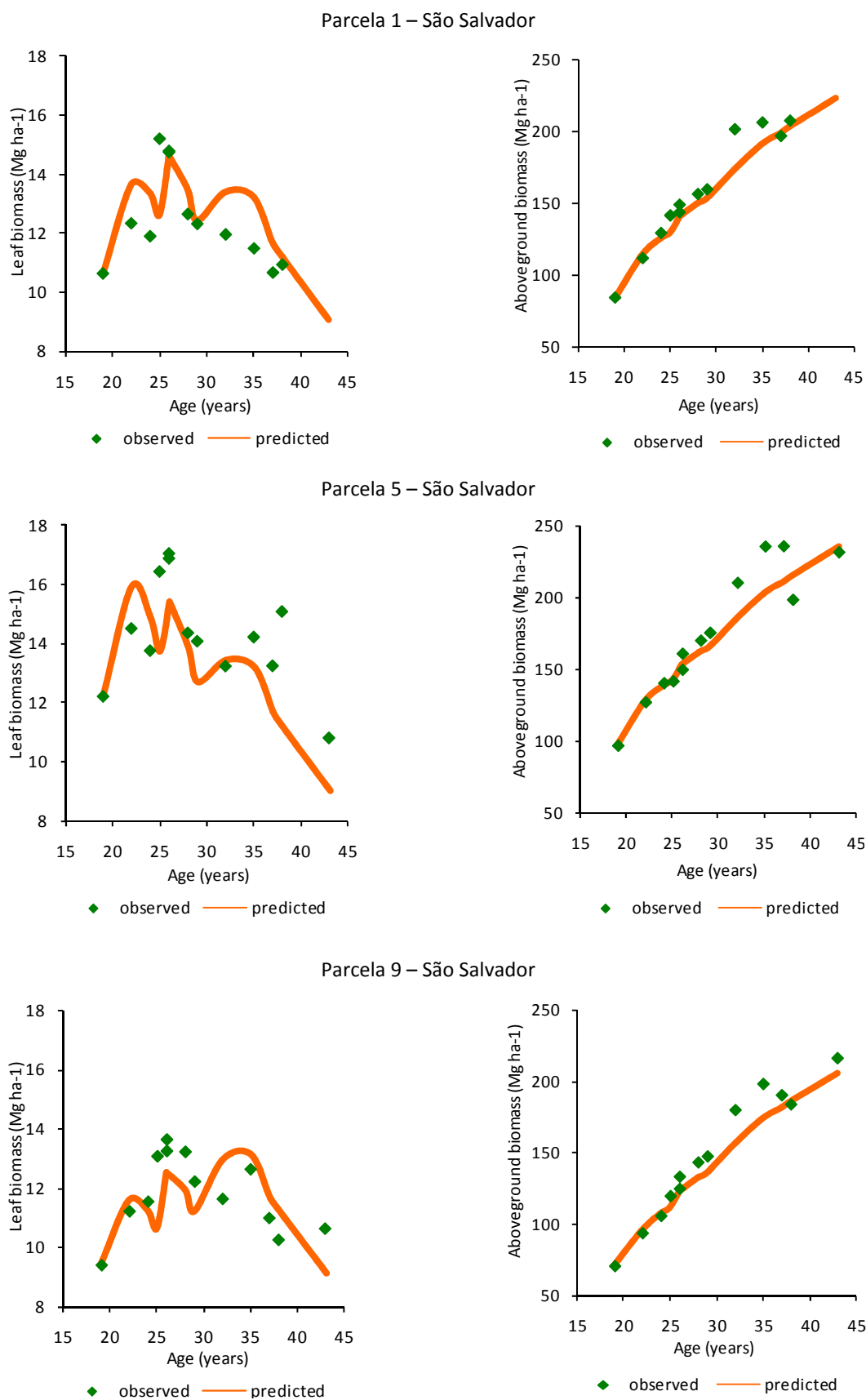


Fig. 17 – Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas testemunhas do ensaio de São Salvador.

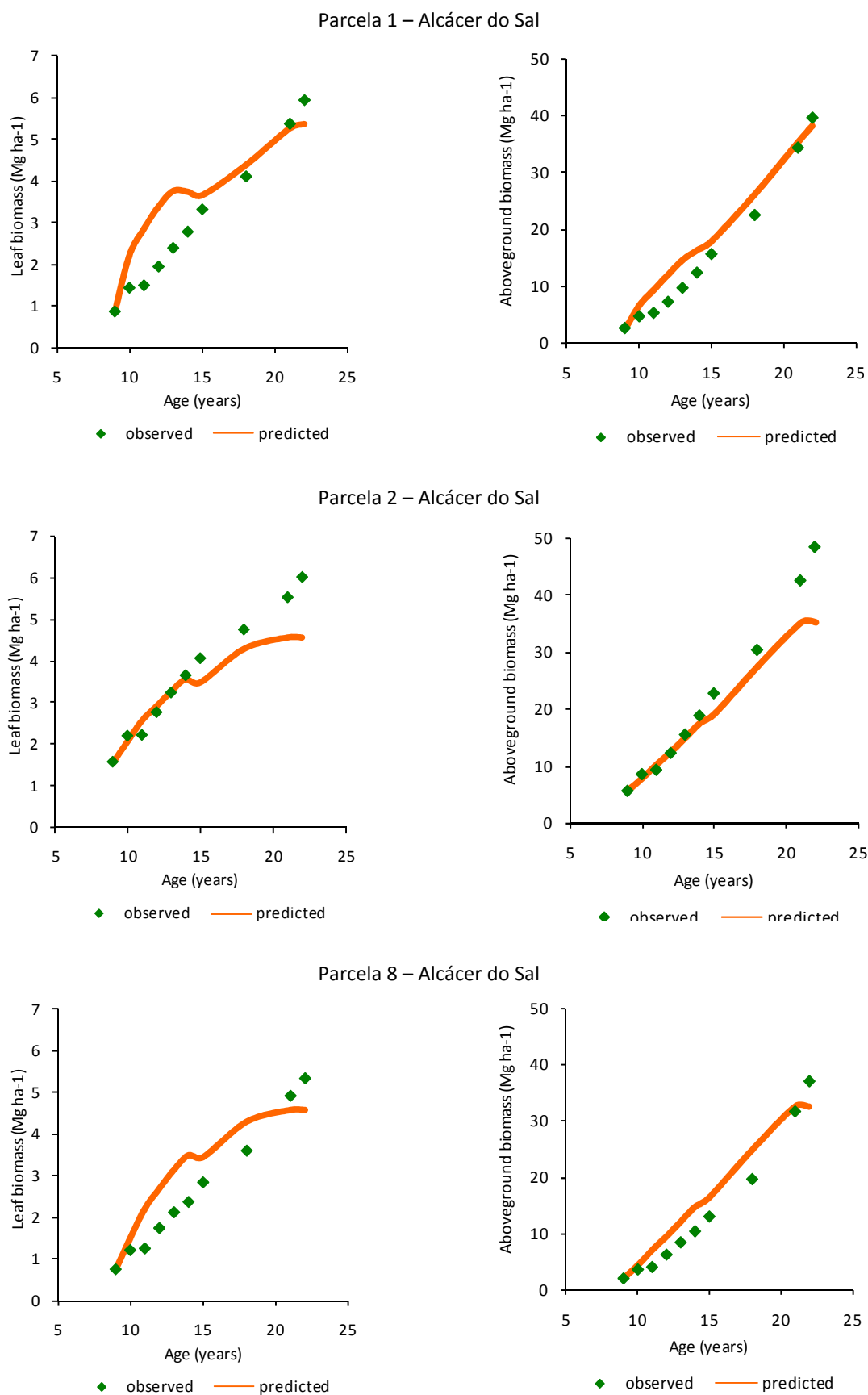


Fig. 18 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas testemunhas do ensaio de Alcácer do Sal.

3.2 Validação

Os resultados obtidos na validação encontram-se ilustrados nas figuras 22 a 24 e as estatísticas de validação no Quadro 9.

Quadro 9 – Estatísticas de validação das parcelas do ensaio de São Salvador. EM – Eficiência de modelação; avg Res – Média dos resíduos; avg |res| - média dos valores absolutos dos resíduos.

Tratamento	Parcela	WI		EM	Wa	
		avg Res	avg res		avg Res	avg res
Testemunhas	1	1.165	1.400	0.948	31.170	31.170
	5	1.660	1.798	0.983	17.651	17.651
	9	1.174	1.399	0.982	15.813	15.813
Desbaste Fraco	2	-1.036	1.294	0.954	-9.647	15.543
	6	-0.383	0.970	0.983	5.173	13.206
	10	1.018	1.289	0.977	8.579	14.184
Desbaste Médio	3	-1.202	1.207	0.510	-1.202	17.056
	7	-1.866	1.891	0.917	-9.402	22.119
	11	-0.286	0.665	0.943	15.664	24.005
Desbaste Forte	4	-1.757	1.757	0.397	-1.757	18.488
	8	-1.859	1.912	0.969	0.739	13.732
	12	-0.961	1.078	0.975	2.107	9.703

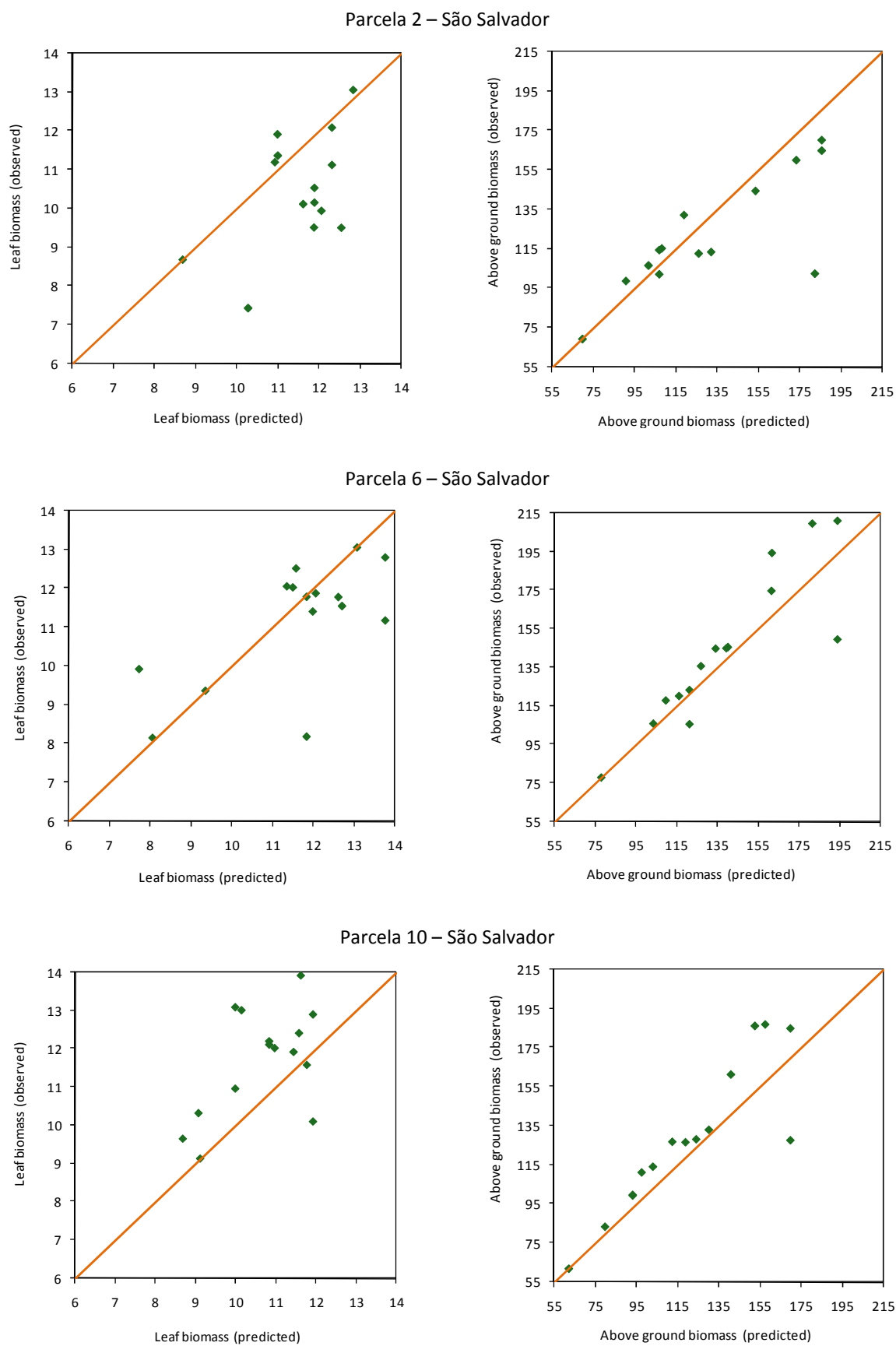


Fig. 19 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Fraco” do ensaio de São Salvador.

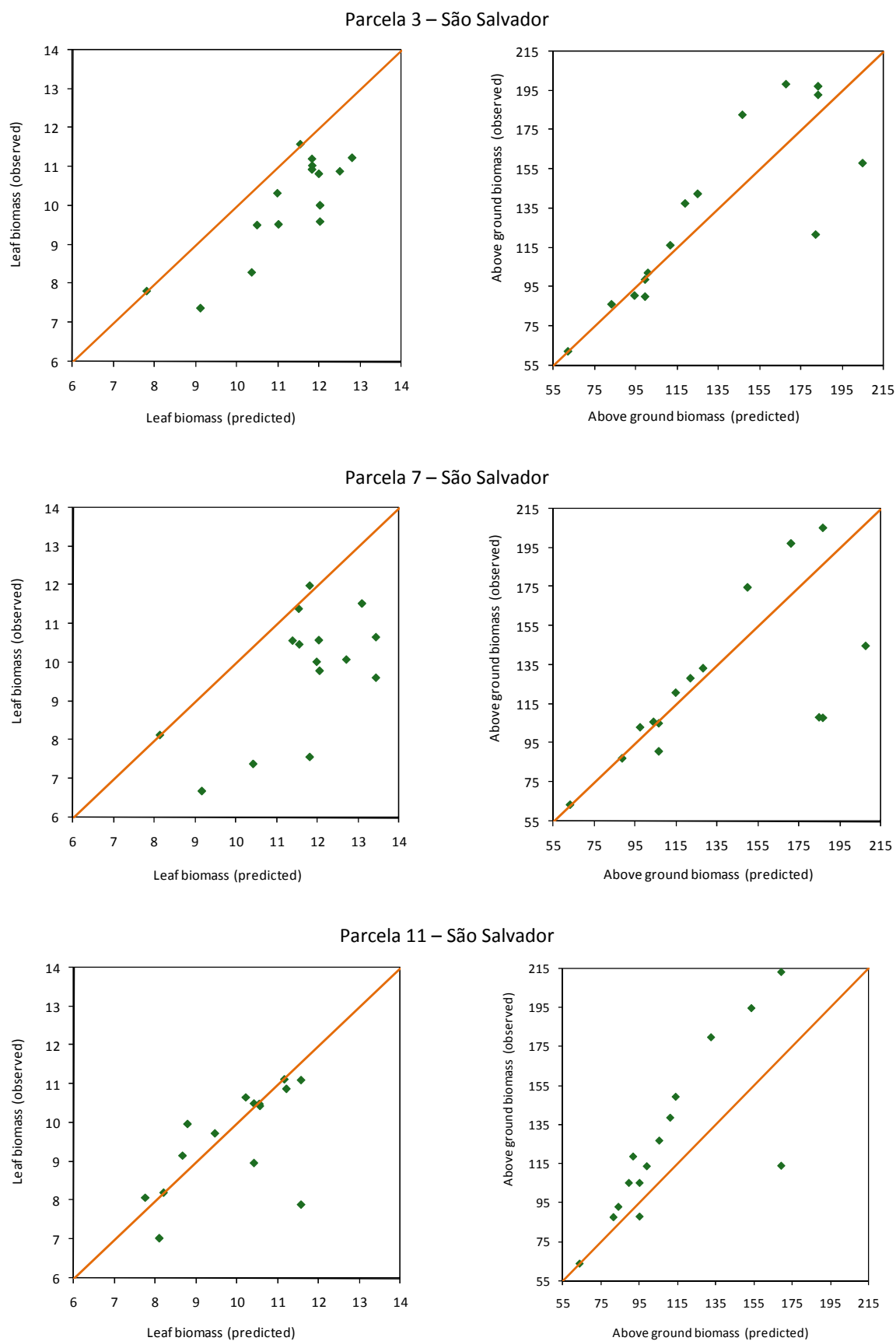


Fig. 20 - Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Médio” do ensaio de São Salvador.

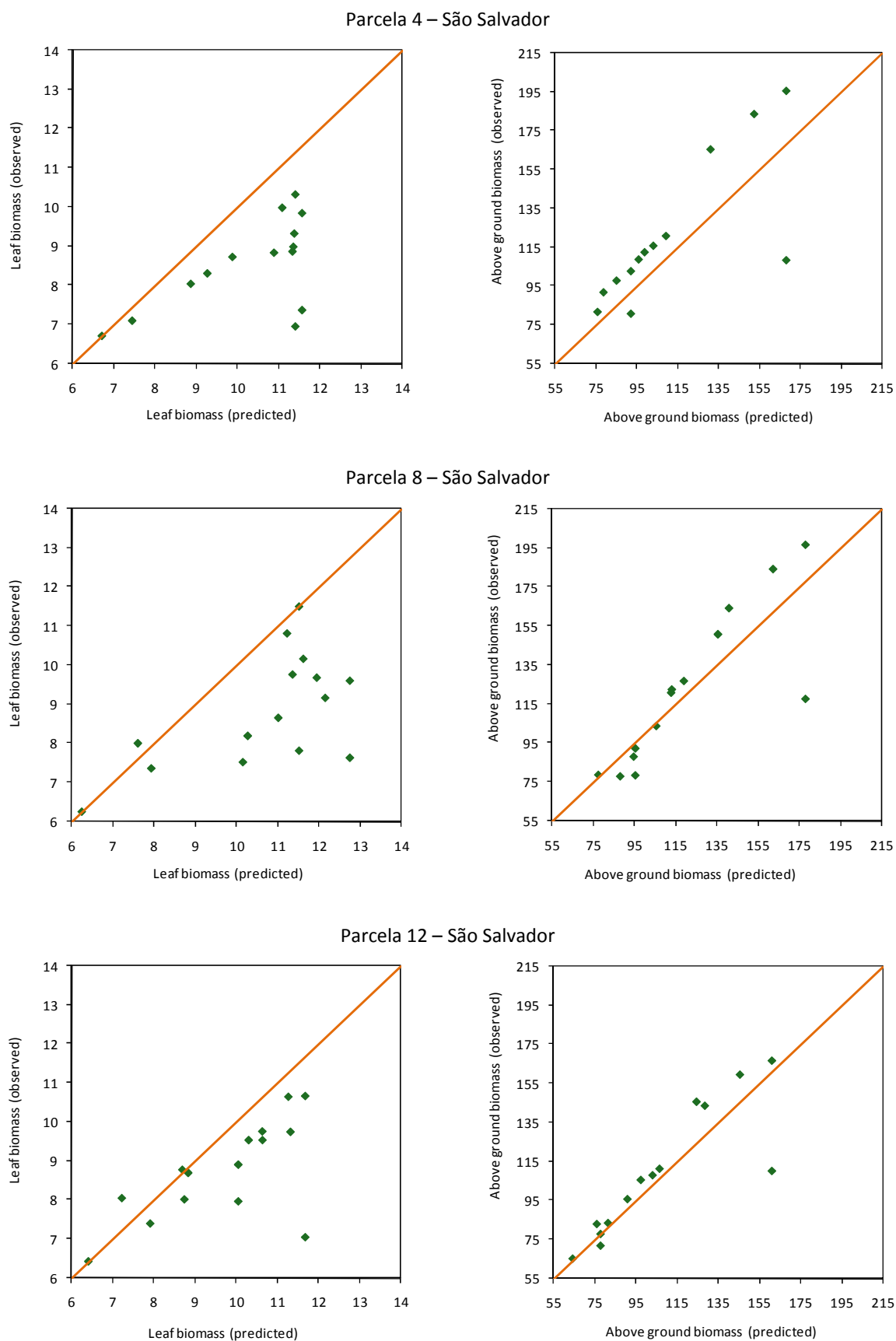


Fig. 21- Biomassa de folhas e biomassa acima do solo predita e observada para as parcelas com o tratamento “Desbaste Forte” do ensaio de São Salvador.

4. DISCUSSÃO

A obtenção de um conjunto único de parâmetros para um modelo de base fisiológica como o aqui estudado é facilitada se existir um bom conhecimento do significado dos parâmetros e respectiva sensibilidade, assim como dos processos fisiológicos que afectam a produção de biomassa e a sua alocação. Os valores dos parâmetros vão depender fortemente da idade do povoamento (Sands, 2004). Os ensaios aqui utilizados apresentavam uma enorme variabilidade de condições de crescimento, idade e delineamentos experimentais. Nenhum dos ensaios aqui utilizados foi estabelecido com o objectivo de calibrar o 3PG. Desta forma, não houve qualquer controlo das condições de fertilização e/ou rega e não existe homogeneidade nos ensaios quanto aos compassos ou aos graus de desbaste.

Posto isto, e seguindo a metodologia proposta por Sands (2004), procurou-se atribuir o maior número possível de parâmetros com base nos dados observados e de estações com a maior variabilidade possível. Os parâmetros obtidos a partir dos dados foram atribuídos à partida, independentemente da sua classe de sensibilidade, e não foram mais alterados. Esses parâmetros foram: a_s , n_s , π_{Rx} , η_{Rn} , w_{sx1000} e n_N . De seguida foram atribuídos valores a parâmetros que se conseguiam encontrar em bibliografia, tais como σ_0 , σ_1 , i_{Rx} e L_{ix} e nos quais também não se fez qualquer alteração posteriormente.

Idealmente, a estimativa de parâmetros deve ser feita com base em valores observados de variáveis de estado, tais como biomassa de folhas, tronco, raízes e densidade do povoamento. Estas são as variáveis primárias que são predictas pelo modelo e são as mais fortemente relacionadas com a sua dinâmica interna. No presente trabalho, não existiam dados disponíveis para as variáveis de biomassa, sendo os valores obtidos a partir de equações de estimativa de biomassa. Este facto, por si só, pode condicionar os resultados das estimativas.

Uma vez que não existiam dados sobre a dinâmica das raízes ou estimativa de parâmetros para o sub-modelo do balanço de água, foram adoptados muitos valores por defeito de outros estudos, tais como: p_2 , T_{min} , T_{opt} , k_F , c_θ , n_θ , m_0 , f_{N0} , n_{fN} , n_{Age} , r^{age} , γ_{N1} , γ_{N0} , $t\gamma_N$, $n\gamma_N$, m_F , m_R , m_S , k , Y , g_{Cx} , L_{Cx} , k_D , g_B , p_{BB0} , p_{BB1} , t_{BB} , t_p , a_H , n_{HB} , n_{HN} , a_V , n_{VB} , n_{VN} , Q_a , Q_b , gDM_{mol} ,

molPAR_MJ. Os valores destes parâmetros não se encontravam disponíveis nas medições efectuadas ou em bibliografia de estudos sobre a espécie *Pinus pinaster*, mas considerou-se aceitável estabelecer uma analogia com outras espécies ou atribuir valores padrão sempre que o seu valor era independente da espécie. Exemplo de valores dependentes de processos fisiológicos bem conhecidos são a constante na equação de Penman-Monteith e o peso molecular da madeira, que são quantidades estequiométricas e claramente independentes da espécie (Sands, 2004). No presente trabalho a espécie mais semelhante ao pinheiro bravo, à qual já tinham sido atribuídos valores, foi a *Pinus radiata*, pinheiro de Monterey (Landsberg *et al.* 2001b; Landsberg *et al.* 2003), cuja ecologia é bastante semelhante à da espécie em estudo, o que justifica a sua utilização.

Ao parâmetro α_{Cx} foi atribuído um valor por defeito intermédio entre as espécies *Pinus radiata* e *Pinus sylvestris*, uma vez que a redução da eficiência quântica não pode ser distinguível de um aumento na alocação a não ser que dados observados de biomassa de raízes estejam disponíveis (Sands e Landsberg, 2002), como no presente trabalho. Para além deste facto, sem dados de raízes não é possível parametrizar a relação da alocação de biomassa, ou separar os efeitos da fertilidade da estação na alocação ou na eficiência quântica da copa, ou distinguir os efeitos no rácio Y na PPL. Sem dados sobre biomassa de raízes e sem turnover de raízes para permitir a independência dos parâmetros h_R , é impossível separar os efeitos da fertilidade da estação (Sands e Landsberg, 2002).

Os restantes parâmetros que não podiam ser medidos directamente, especialmente os mais sensíveis, foram estimados fazendo variar os seus valores até que o modelo se ajustasse aos dados observados, sem que no entanto perdessem o seu significado fisiológico. Os parâmetros ajustados foram: p_{20} , γ_{Fx} , T_{max} , t_x , τ_θ e t_c .

De uma forma geral, o modelo tem um comportamento bastante satisfatório na previsão da biomassa acima do solo, tendo apresentado valores de eficiência de modelação (EM) positivos e próximos de um (Quadro 9). A biomassa foliar apresenta erros médios da ordem dos 3%, embora a sua predição piore com o aumento do grau de desbaste. O modelo tem sido algo criticado quanto ao seu desempenho em povoamento em que ocorre desbaste, situação esta que pode ser verificada no presente trabalho (Figuras 19, 20 e 21). A biomassa

de folhas é uma das fracções mais importantes do modelo, uma vez que os principais fundamentos do mesmo se baseiam na conversão da radiação fotossinteticamente activa em carboidratos em função da área foliar. Assim sendo, é fundamental que a previsão de biomassa foliar seja a mais precisa possível, pois dela vai resultar o melhor ou pior desempenho do modelo. Note-se que os desvios encontrados na estimativa da biomassa foliar são compatíveis com a boa capacidade preditiva da biomassa total.

Relativamente ao parâmetro t_c , embora de sensibilidade média e de baixo impacto nos resultados, optou-se por deixá-lo como um parâmetro variável devido à sua definição. A idade em que o copado fecha varia imenso de povoamento para povoamento e depende de imensos factores silviculturais como o compasso, a densidade, ocorrência e grau de desbaste e, da própria qualidade da estação. Poder-se-ia sugerir a criação de um modelo simples em que o valor dependia da densidade do povoamento, do índice de qualidade da estação, compasso e grau de desbaste, que seria acrescentado ao modelo actual como variável de inicialização. Porém, para efeitos do presente estudo, e dado que os dois ensaios utilizados representam situações por si só bastantes diferentes, havia a necessidade de tentar fixar o valor, tendo-se chegado a um valor para cada ensaio.

A quantidade de parâmetros que o modelo permite alterar é suficiente para que o mesmo se ajuste a qualquer padrão de crescimento, pelo que é importante, quando se calibra o modelo, que se consiga calcular a maior parte dos parâmetros *a priori*, em vez de se ajustar aos valores observados (Landsberg *et al.* 2003). Todavia, os dados de inicialização necessários para correr o modelo também possuem o seu papel nos resultados. É necessário fornecer ao programa informação acerca do tipo de solo, da disponibilidade em água do mesmo e atribuir um índice de fertilidade à estação. Ora, a inadequabilidade dos dados existentes de solo e o pobre conhecimento acerca das relações entre as características químicas do solo e o crescimento das plantas, tornam difícil estabelecer valores para o índice de fertilidade (FR). Idealmente, uma estação de qualidade óptima e sem restrições em água e nutrientes teria um índice de fertilidade 1, e todas as estações fora destas condições seriam comparadas com esta. Tal situação não existia nos dados disponíveis e não foi possível criá-la, pelo que foi extremamente difícil decidir que valores atribuir. Segundo Landsberg (1997), quanto maior for o índice de fertilidade, menor será a alocação de

biomassa para as raízes. Outro dado de inicialização do modelo é o tipo de solo, mais especificamente, a sua textura. O modelo suporta apenas 4 classes de solo, o que é limitativo e pouco representativo da enorme variabilidade que ocorre na realidade.

Após a obtenção de um conjunto de valores para os parâmetros do modelo, recorrendo ao ficheiro em Excel entretanto criado, foi feito um teste usando o modelo original. Os dados dos ensaios utilizados para calibrar foram adicionados ao 3PG usaram-se inicialmente os parâmetros da espécie *P. radiata*. Os resultados foram bastante díspares dos dados observados. Porém, quando se alteraram os parâmetros para os aqui obtidos, o modelo aproximou-se bastante dos valores observados, no geral. É de referir que o modelo prediz volumes e áreas basais, mas tal não foi tido em consideração aqui, pois já foi demonstrado no passado que os resultados não são satisfatórios.

5. CONCLUSÕES

De uma forma geral, o modelo apresentou resultados bastante razoáveis na predição da biomassa acima do solo, que, em última análise, é a mais importante para efeitos de gestão.

A metodologia aqui empregue apresenta algumas limitações, no sentido em que não foi possível reduzir ao mínimo as combinações de parâmetros ajustáveis, o que torna o desafio muito grande e complexo, uma vez que os factores que influenciam a produção interagem entre si e são dependentes uns dos outros. Seria necessário obter informação diferente da disponível, uma vez que a que existe é suficiente em quantidade, mas não em qualidade. Apesar de tudo isto, o modelo apresenta como vantagens o facto de serem necessárias poucas medições e de não ser necessária a análise de grandes quantidades de dados e, dadas as condicionantes, apresentar um comportamento bastante razoável.

Dadas as limitações expostas, não é possível afirmar com certeza e segurança, que o conjunto de parâmetros obtido permite uma utilização generalizada ao país. Os resultados são promissores, mas serão necessários mais estudos e realizar mais medições, especialmente de biomassa e de queda de folhada, de forma a se poder alcançar um conjunto único. Seria interessante realizar estudos específicos para a obtenção de valores de alguns dos parâmetros próprios de cada espécie para o pinheiro bravo, dada a sua importância ecológica e económica em Portugal. Tais estudos iriam facilitar e favorecer a obtenção de um conjunto único de parâmetros que se adequasse à grande maioria de situações em Portugal, na medida em que iriam restringir o número de parâmetros a serem ajustados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A., J. Landsberg and P. Sands 2004a. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations, *For. Ecol. Manage.* 193, pp. 179-195.
- Battaglia, M. and P. Sands 1997. Modelling site productivity of *Eucalytus globulus* in response to climatic and site factors. *J. Plant Physiol.* 24:831-850.
- Beets, P.N.W., D. 1996. Carbon partitioning in *Pinus radiata* stands in relation to foliage nitrogen status, *Tree Physiol.* 16, pp. 131-138.
- CELPA 2007. Boletim Estatístico 2006.
- Coops, N.C., R.H. Waring and B.E. Law 2005. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG., *Ecol. Modell.* 183, pp. 1-18.
- Cortez, N. 1996. Compartimentos e ciclos de nutrientes em Plantações de *Eucalyptus globulus* Labill. spp. *Globulus* e *Pinus pinaster* Aiton. Universidade Técnica de Lisboa, Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Agronomia para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agronómica.
- Dye, P. 2001. Modelling growth and water use in four *Pinus patula* stands with the 3-PG model, *S. Afr. For. J.* 191, pp. 53-64.
- Dye, P., S. Jacobs and D. Drew 2004. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantations stands in Zululand, South Africa, *For. Ecol. Manage.* 193, pp. 197-218.
- Esprey, L.J., P.J. Sands and C.W. Smith 2004. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management.* 193:235-250.
- Fontes, L., J. Landsberg, J. Tome, M. Tome, C.A. Pacheco, P. Soares and C. Araujo 2006. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere.* 36:3209-3221.
- Freire, J.P.A. 2002. Modelação do crescimento da árvore individual independente da distância para *pinus pinaster aiton.* em Portugal. Universidade Técnica De Lisboa - Instituto Superior de Agronomia - Departamento de Engenharia Florestal.

- Girardin, M.P.R., F.; Bernier, P.Y.; Tardif, J.C. 2008. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: A comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecological Modelling*. 213:209-228.
- Granier, S., D. Loustau and N. Bréda 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index, *Ann. For. Sci.* 57, pp. 755-765.
- Jorge, M.F. 2001. Caracterização da qualidade da madeira de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.) em diferentes condições de crescimento e silvicultura, com vista à optimização das utilizações finais em serração. *In* Relatório Final - Projecto Pamaf 8165. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Landsberg, J.J. and S.T. Gower 1997. *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*. Academic Press, London, p. 354.
- Landsberg, J.J., K. Johnsen, T. Albaugh, H. Allen and S. McKeand 2001a. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments, *For. Sci.* 47, pp. 43-51.
- Landsberg, J.J. and R.H. Waring 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. 95:209-228.
- Landsberg, J.J., R.H. Waring and N.C. Coops 2001b. The 3-PG forest model: matters arising from evaluation against plantation data from different countries. *Eur. For. Inst. Proc.* 41, pp. 31-43.
- Landsberg, J.J., R.H. Waring and N.C. Coops 2003. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management*. 172:199-214.
- Landsberg, J.J.G., S.T. 1997a. *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*. Academic Press, London, p. 354.
- Landsberg, J.J.W., R. H. 1997b. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. 95:209-228.
- Law, B.E., R.H. Waring, Anthony, P.M. and J.D. Aber 2000. Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem, and an evaluation of two generalized models, *Global Change Biol.* 6, pp. 155-168.

- Lopes, D.M.M. 2005. Estimating Net Primary Production in *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* Ecosystems in Portugal. *In* School of Earth Sciences and Geography. Kingston University, Kingston, p. 293.
- Oliveira, Â.C. and A.V. Correia 2002. Principais Espécies Florestais com interesse para Portugal - Zonas de influência Atlântica. *In* Estudos e Informação nº 322 Ed. D.G.d. Florestas, Lisboa.
- Páscoa, M., F. 2001. Valorização do Pinhal bravo – intensificação cultural, modelação do crescimento e produção, gestão e planeamento estratégico. *In* Relatório final, contrato PRAXIS n.º 3/3.2/FLOR/2120/95. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Porté, A., A. Bosc, I. Champion and D. Loustau 2000. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. *In* Ann. For. Sci. 57, pp. 73 - 86.
- Rebelo, J.C.D.e.M.P. 1981. Instalação de parcelas de controle de desbastes - perímetro florestal de S. Salvador - Viseu. Universidade Técnica De Lisboa - Instituto Superior de Agronomia - Departamento de Engenharia Florestal.
- Running, S.W. and S.T. Gower 1991. FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocations and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9, pp. 147 - 160.
- Sands, P. 2004. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. *In* Project B4: Modeling Productivity and Wood Quality. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, Hobart, Australia.
- Sands, P.J. and J.J. Landsberg 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*. 163:273-292.
- Shimoyama, V.R.d.S. and L.E.G. Barrichelo 1989. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal Ed. S.T.I.-. 0100-8137. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais ESAL/USP - Departamento de Ciências Florestais, Piracicaba, pp. 1-22.
- Stape, J., M. Ryan and D. Binkley 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients, *For. Ecol. Manage.* 193, pp. 219-234.
- Tavares, M. 2000. Regeneração, Condução e crescimento do Pinhal bravo das regiões Litoral e Interior Centro,, Lisboa, p. 43 p.

- Tomé, J. 1997. Modelação da Absorção da Radiação, da Fotossíntese e da Transpiração em *Eucalyptus globulus* Labill., Lisboa, Portugal.
- Tomé, M., S. Barreiro, A. Cortiçada, J.A. Paulo, A. Meyer and T. Ramos 2007. Inventário florestal 2005-2006. Áreas, volumes e biomassas dos povoamentos florestais. Resultados Nacionais e por NUT's II e III. Publicações GIMREF - RT 5/2007. Centro de Estudos Florestais - Instituto Superior de Agronomia - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa - Portugal.
- Tomé, M.T., J.; Soares, P.; Araújo, C. 2004. Hybridizing a whole stand process-based model with an individual tree growth and yield model for *Eucalyptus globulus* in Portugal Ed. I.C.M.F. Production, Vienna, Austria.
- Vanclay, J.K.S., J.P.; Garcia, O. 1995. Evaluating Forest Growth Models. *In* IUFRO XX World Congress, Tampere, Finlândia, pp. 11-22.
- Waring, R.H. 2000. A process model analysis of environmental limitations on the growth of Sitka spruce plantations in Great Britain, *Forestry* 73, pp. 65-79.
- Waring, R.H., J.J. Landsberg and M. Williams 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production?, *Tree Physiol.* 18, pp. 129-134.
- Waring, R.H. and N. McDowell 2002. Use of physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances, *Tree Physiol.* 22, pp. 179-188.
- Zeigler, B.P., H. Praehofer and T. Gon Kim 2000. Theory of Modeling and Simulation - Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. Academic Press, London. 510 p.

Bases não bibliográficas:

<http://www.ensisjv.com/Default.aspx?PageContentID=357&tabid=414> (Visitado a 02/10/07)

http://www.biodiversityinternational.org/networks/euforgen/Distribution_Maps/EUFORGEN_GIS.htm (visitado a 29/Fev/08)

http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=89&id=725 (Visitado a 21/Ago/08)

7. ANEXOS

Anexo 1 - Tabelas auxiliares - Códigos utilizados na base de dados

TC_codensaio	
Cod_ensaio	Ensaio
1	Alcácer do Sal
2	Castanheira de Pêra
3	Covilhã
4	Góis
5	Lousã
6	MNL1
7	MNL2
8	Pinhal Cré
9	São Salvador
10	Vale de Cavalos
11	MNL3

TC_codest	
codest	descrição
0	bom estado
1	problemas fitossanitários
2	problemas na altura
3	problemas ao nível do DAP
4	morta
5	bifurcada
6	desbastada, abatida, roubada
7	defeito no DAP e na altura
8	quase morta
9	outras situações
10	Retanchada
64	Árvore saída em desbaste neste ano

TC_codmed	
codmed	descrição
0	Medição apenas do diâmetro
1	Medição do diâmetro e da altura
2	Medição da altura em árvores jovens
3	sem medição
4	árvore com diâmetro corrigido/estimado
5	árvore com altura corrigida/estimada

TC_codtrat	
cod_trat	Tratamento
0	Testemunha
1	Limpeza
2	Desbaste Forte
3	Desbaste Médio
4	Desbaste Fraco
5	Comp 1x1
6	Comp 1x2
7	Comp 1x3
8	Comp 1x4
9	Comp 1x5
10	Comp 2x1
11	Comp 2x2
12	Comp 2x3
13	Comp 2x4
14	Comp 2x5
15	Comp 3x1
16	Comp 3x2
17	Comp 3x3
18	Comp 3x4
19	Comp 3x5
20	Comp 4x1
21	Comp 4x2
22	Comp 4x3
23	Comp 4x4
24	Comp 4x5
25	Comp 5x1
26	Comp 5x2
27	Comp 5x3
28	Comp 5x4
29	Comp 5x5

TC_codarv	
codarv	descrição
0	árvore da bordadura
1	árvore da parcela útil
2	árvore da subparcela